



Tiago Emanuel Pessoa Marques

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

**Desenvolvimento e melhoria dos
processos de soldadura por ultrassons
de fios de cobre**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Rosa Miranda, Prof. Doutora, FCT-UNL
Co-orientador: Filipe F. Anunciação, Connections
supervisor, Delphi

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Jorge Joaquim Pamies Teixeira
Arguente: Prof. Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos
Vogal: Prof. Doutora Rosa Maria Mendes Miranda

Desenvolvimento e melhoria dos processos de soldadura por ultrassons de fios de cobre

Copyright © 2014 Tiago Emanuel Pessoa Marques,

Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor

Aos meus pais e em memória dos meus bisavós.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à minha orientadora, Professora Doutora Rosa Miranda, pela confiança, apoio e disponibilidade que foram imprescindíveis à realização desta dissertação.

À empresa pela oportunidade dada na realização de um trabalho tão interessante que é a soldadura por ultrassons que me permitiu adquirir conhecimentos numa área desconhecida. Este agradecimento abrange todas as pessoas envolvidas neste projeto, com especial ênfase para o grupo de Engenheiros: Filipe Anunciação, Sérgio Bento, António Silva e Alexandre Fernandes pela sua amizade, disponibilidade, conhecimento e empenho que doaram a longo deste trabalho, e aos técnicos José Garcia e Ilda Ribeiro que facilitaram muito a minha adaptação a empresa e contribuíram muito com todo o seu conhecimento do processo.

Gostaria de agradecer a todos os meus colegas de curso que nos momentos difíceis me ajudaram a ultrapassar os obstáculos, me motivaram e deram força para continuar a caminhar em frente nessas alturas mais complicadas em particular a João Leão, Joana Margarida, Francisco Portugal, Bruno Costa, Rui Pereira, David Henriques, André Monteiro e Guilherme Viegas.

Aos meus pais e namorada agradeço o mais importante de todos os apoios, o amor que sempre me deram.

A todos o meu agradecimento e o meu muito obrigado.

RESUMO

A soldadura por ultrassons é um processo de ligação de materiais que ocorre no estado sólido, por vibração de alta frequência dos materiais a unir e aplicação de pressão.

A pressão promove o contacto entre superfícies dos materiais a soldar, a vibração origina fricção entre as superfícies dos mesmos, e dessa fricção resulta calor localizado que promove a deformação plástica das superfícies. É importante o estado da superfície, nomeadamente a rugosidade e a presença de óxidos ou outras sujidades.

Este é o processo mais utilizado no fabrico de cablagens para a indústria automóvel.

O presente trabalho teve como objetivo analisar e otimizar o processo na ligação de cablagens e comparar o desempenho dos equipamentos de ultrassons utilizados pela empresa.

Essa comparação foi realizada através da caracterização dos parâmetros de soldadura, da análise da estabilidade, dos resultados dos ensaios destrutivos, da otimização de parâmetros de soldadura, da verificação dos defeitos e contabilização dos tempos de manutenção de cada um dos equipamentos.

Os resultados experimentais permitiram verificar que a qualidade de ligação através do processo de soldadura por ultrassons, depende dos parâmetros utilizado pelo equipamento, da sua qualidade superficial e dureza do material utilizado. O novo equipamento apresentou uma menor variação de altura de junta e uma menor rejeição de soldaduras, apresentando este uma gama de funcionamento de junções superior quando comparado com os equipamentos atualmente utilizados pela empresa.

Palavras-chave

Produção de Cablagens

Soldadura por Ultrassons

Equipamentos

Parâmetros de soldadura

Análise de estabilidade

Defeitos na soldadura

ABSTRACT

The ultrasonic welding is a method of bonding material that occurs in the solid state, high frequency vibration of the materials to be joined and the application of pressure.

The pressure promotes contact between the surfaces of the materials to be welded, the vibration creates friction between the surfaces. This friction results in localized heat which promotes plastic deformation of the surfaces. It is important surface condition, in particular the roughness and contamination/oxides.

This process is used in wiring harnesses manufacturing for the automotive industry.

This study aimed to analyze and optimize the process of connecting wiring and compare the performance of ultrasonic equipment used by the company.

This evaluation was performed with main focus on default and optimization of welding parameters, process stability analysis, destructive testing, checking of defects and recording of maintenance time of each equipment.

The experimental results indicated that the link quality by ultrasonic welding process, depends on the parameters used by the equipment from its surface quality and hardness of the material used. The new equipment had a smaller variation joint height and a lower bounce welds, with this an operating range of top joints when compared with the equipment currently used by the company.

KEY WORDS

Wiring production

Ultrasonic welding

Equipments

Welding parameters

Stability analysis

Defects in welding

Índice de Matérias

Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vii
Abstract	ix
Índice de Tabelas.....	xv
Índice de Figuras	xvii
Nomenclatura	xix
1 Introdução.....	1
1.1 Motivação e objetivo	1
1.2 Estrutura da dissertação.....	2
2 Estado de arte	3
2.1 Material utilizado na produção de cablagens da indústria automóvel.....	3
2.1.1 Configurações de ligações de fio possíveis	4
2.2 Processos de ligação.....	5
2.2.1 Cravamento (processo Mecânico)	5
2.2.2 Soldadura por ultrassons (processo Termomecânico)	7
2.2.2.1 Ligação por ultrassons.....	8
2.2.2.2 Equipamento.....	9
2.2.2.1 Parâmetros de soldadura ultrassons.....	14
2.2.2.2 Parâmetros do material	17
2.2.2.3 Controlo do processo.....	17
2.2.2.4 O controlo estatístico da qualidade.....	18
2.2.2.5 Fatores que influenciam o controlo do processo	19
2.2.2.6 Vantagens do processo de soldadura por ultrassons.....	20
3 Caracterização dos equipamentos em estudo.....	21
3.1 Introdução.....	21
3.2 Características dos equipamentos utilizados	21

3.3	Curvas de funcionamento dos diferentes equipamentos	24
4	Experimentação.....	27
4.1	Testes de caracterização do material utilizado no fabrico de cablagens	27
4.1.1	Procedimento experimental.....	28
4.2	Análise experimental dos parâmetros de cada um dos equipamentos.....	29
4.2.1	Frequência	29
4.2.2	Conversão de valor percentual da amplitude em milímetros.....	29
4.2.3	Análise da Pressão e medição do consumo ar comprimido.....	30
4.2.4	Comparação da força aplicada na soldadura	33
4.3	Análise de Estabilidade	33
4.4	Verificações da precisão de leitura dos equipamentos	35
4.5	Performance dos equipamentos.....	35
4.5.1	Ensaio de Fadiga.....	36
4.5.2	Ensaio de dobragem.....	39
4.5.3	Ensaio de <i>pull</i> e <i>peel</i>	40
4.5.4	Otimização da configuração C3	42
4.6	Defeitos de soldadura	42
4.7	Tempos de arranque do repouso e manutenção dos diferentes equipamentos	44
5	Resultados e discussão	45
5.1	Resultados dos testes de caracterização do material	45
5.2	Resultados da análise experimental dos parâmetros de cada um dos equipamentos	46
5.3	Resultados dos testes de análise de estabilidade	49
5.4	Resultados das verificações da precisão de leitura.....	55
5.5	Resultados dos testes de performance dos equipamentos	57
5.5.1	Ensaio de Fadiga.....	57
5.5.2	Ensaio de dobragem.....	57
5.5.3	Ensaio de <i>pull</i> e <i>peel</i>	60
5.5.4	OTIMIZAÇÃO DA configuração C3 (1,5 mm ²).....	62

5.6	Defeitos nas soldaduras	64
5.7	Resultados dos testes ao tempo de arranque do repouso e manutenção dos diferentes equipamentos	66
6	Conclusões e Proposta de Trabalho Futuro	69
6.1	Conclusões	69
6.2	Sugestões para trabalho futuro	70
	Bibliografia.....	71
	ANEXOS.....	75
	Anexo A-Dados estatísticos para construção das curvas de estabilidade.....	i

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Condutibilidade elétrica relativa e resistividade de alguns metais.[1]	3
Tabela 2.2 - Composição química do Cobre utilizado	4
Tabela 2.3 - Propriedades do Cobre utilizado	4
Tabela 3.1 – Parâmetros utilizáveis dos diferentes equipamentos.	21
Tabela 3.2 - Tabela de comparação das características dos diferentes equipamentos	23
Tabela 4.1 - Nomenclatura das secções.....	28
Tabela 4.2 - Secções utilizadas para comparação de estabilidade entre o equipamento B1 e A134	
Tabela 4.3 - secções, material e cadência utilizada no estudo de estabilidade (B1 vs A2)	34
Tabela 4.4 - Secções utilizadas para verificações das medições dos clips	35
Tabela 4.5 - Secções e configurações utilizadas nos ensaios de dobra da soldadura	39
Tabela 4.6 - Configurações ensaios de peel	41
Tabela 4.7- Configurações ensaios de pull.....	41
Tabela 4.8 - Configurações utilizadas para análise dos defeitos de soldadura.....	43
Tabela 4.9 - Sequência utilizada para análise dos defeitos de soldadura	44
Tabela 5.1 - Medições de pressão	47
Tabela 5.2 - Resultados dos ensaios de dobra do equipamento A1.....	58
Tabela 5.3 – Resultados dos ensaios de dobra do equipamento B1	59
Tabela 5.4 – Valores mínimos para cálculo do C_{pk} dos ensaios de <i>Pull</i>	60
Tabela 5.5 – Valores mínimos para cálculo do C_{pk} dos ensaios de <i>Peel</i>	61
Tabela 5.6 – Parâmetros utilizado para efetuar a otimização.....	62
Tabela 5.7 - Defeitos de soldadura secção pequena, média e grande.....	64
Tabela 5.8 – Defeitos de soldadura numa secção elevada e com cadências elevadas.....	65
Tabela 5.9 – Defeitos de soldadura em modo de sequência.....	66
Tabela 5.10 - Tempo de desmontagem e montagem do sonótrodo em ambos os equipamentos	67
Tabela 5.11 - Tempo de desmontagem e montagem da bigorna e placa de retoque em ambos os equipamentos	67
Anexos A	
Tabela A 1 - Dados estatísticos para construção das curvas de estabilidade entre o equipamento B1 e o equipamento A1	i
Tabela A 2 - Dados estatísticos para construção das curvas de estabilidade entre o equipamento B1 e o equipamento A2	ii
Tabela A 3 - Dados estatísticos para construção das curvas de estabilidade entre o equipamento B1 e o equipamento A3	iii

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Clip de geometria cega e geometria cruzada	4
Figura 2.2 - Formas de ativação energética dos processos de ligação (Adaptação da Figura 1.27 do livro [3]).....	5
Figura 2.3 - Komax bt 722	6
Figura 2.4 - Peças de interação no cravamento	6
Figura 2.5 - Movimento de cravamento [20]	7
Figura 2.6 - Cravamento união terminal condutor [9].....	7
Figura 2.7 - Ligação por adesão e difusão [17].....	8
Figura 2.8 - Transmissão de energia através dos multifilares de cobre [13]	9
Figura 2.9 - Equipamento de soldadura por ultrassons <i>Wedge-reed</i> [19]	9
Figura 2.10 - Equipamento de soldadura por ultrassons <i>Lateral Drive</i> [19].....	10
Figura 2.11 - Esquema de transformação de energia elétrica em vibração	10
Figura 2.12 - Transdutor magnetoestrutivo e piezoelétrico [23]	11
Figura 2.13 - Esquema de conversor, amplificador e sonótrodo	12
Figura 2.14 - Tempo de soldadura aumenta em função da amplitude [35]	15
Figura 2.15 - Influência da energia no incremento da resistência mecânica utilizando vários tipos de bigorna [12].....	16
Figura 2.16 - Ensaio <i>Pull</i> e <i>Peel</i>	18
Figura 3.1 - Sistema de ondas da bigorna dos equipamentos B1, A2 e A1 [32]	22
Figura 3.2 – Variação da energia de soldadura com a secção a soldar	24
Figura 3.3 – Variação da pressão aplicada a soldadura com a secção a soldar	24
Figura 3.4 – Evolução da amplitude de vibração com a secção a soldar	25
Figura 3.5 – Evolução da largura de soldadura com a secção a soldar	25
Figura 4.1 - Equipamento para medição da pressão, consumo de ar e fugas no sistema	30
Figura 4.2 - Ligação de entrada de ar comprimido do equipamento B1 ao equipamento SMC .	30
Figura 4.3 - Ligação de saída de ar comprimido do equipamento SMC para o equipamento B1	31
Figura 4.4 - Ligação de entrada de ar comprimido do equipamento A3 ao equipamento SMC .	31
Figura 4.5 - Ligação de saída de ar comprimido do equipamento SMC para o equipamento A3	31
Figura 4.6 - Ligação de entrada para medição de caudal consumido no equipamento B1	32
Figura 4.7 - Ligação de saída para medição de caudal consumido no equipamento B1	32
Figura 4.8 - Ligação saída e entrada no equipamento A3	32
Figura 4.9 - Dinamómetro eletrónico Mav Prüftechnik GMBH do fornecedor MAV.....	36

Figura 4.10 - Clips utilizados nos ensaios de fadiga com a configuração CC2xCC com os diferentes reforços da zona de soldadura.....	37
Figura 4.11 - Clip de ensaios de fadiga com a configuração CC3	37
Figura 4.12 - Conjunto de rolos utilizados nos ensaios de fadiga e colocação do fio.....	37
Figura 4.13 - Equipamento ensaio de fadiga, garra de fixação, corrediça e motor	38
Figura 4.14 - Equipamento ensaio de fadiga, segunda garra de fixação e peso	38
Figura 4.15 - Ensaio de dobragem CC2xCC3.....	40
Figura 4.16 - Ensaio de peel e pull respetivamente	41
Figura 4.17 - Defeitos de Soldadura numa secção de 12 mm ²	43
Figura 5.1 - Resultados dos ensaios de tração dos multifilares da liga de cobre	45
Figura 5.2 - Resultados dos ensaios de tração dos multifilares de cobre	45
Figura 5.3 - Gráfico da amplitude de vibração.....	46
Figura 5.4 - Gráficos resultantes dos ensaios de estabilidade entre o equipamento B1 e A1	49
Figura 5.5 - Gráficos de tendência dos ensaios de estabilidade para os equipamentos B1 e A1	50
Figura 5.6 - Gráficos resultantes dos ensaios de estabilidade entre o equipamento B1 e A2	52
Figura 5.7 - Gráficos de tendência dos ensaios de estabilidade para os equipamentos B1 e A2	53
Figura 5.8 - Gráfico para comparação de estabilidade de ambos os equipamentos em secções elevadas com cadências de 6 e 9 soldaduras por minuto.....	54
Figura 5.9 - Curvas de tendência da configuração M3 para o equipamento B1.....	55
Figura 5.10 - Curvas de tendência para a configuração M3 para o equipamento A3	55
Figura 5.11 - Valor máximo do erro de medição da altura final para os diferentes equipamentos	56
Figura 5.12 - Valor máximo do erro de medição da largura de soldadura para os diferentes equipamentos.....	56
Figura 5.13 – Resultados dos ensaios de fadiga.....	57
Figura 5.14 - Resultados dos ensaios de pull para os diferentes equipamentos	60
Figura 5.15 - Média dos valores de C_{pk} para os ensaios de Pull.....	61
Figura 5.16 - Resultados dos ensaios de peel para os diferentes equipamentos.....	62
Figura 5.17 - Valor de C_{pk} em função da pressão para os ensaios de otimização	63
Figura 5.18 - Valores de C_{pk} para configuração C3 após otimização de parâmetros	63

NOMENCLATURA

Amplitude	Distância, pico a pico, percorrida pelo sonótrodo (%).
Cabo	Conjunto de multifilares de cobre revestidos por isolante.
Clip	Denominação da união através da soldadura por ultrassons.
Módulo	Estura constituída por todos os componentes, exceto a fonte de alimentação e controlador.
Multifilares	Conjunto de filamentos de cobre que constituem o interior do cabo.
Peel	Ensaio mecânico destrutivo de corte em que todos os fios soldados se encontram do mesmo lado da soldadura tracionando o fio superior em sentido oposto aos outros e avaliando a força necessária para quebrar a ligação ponto a ponto.
Pull	Ensaio mecânico destrutivo de corte feito com fios de ambos os lados da soldadura este avalia a força necessária para quebrar simultaneamente todos os pontos de ligação.
Secção total	Corresponde à área de um clip que é obtida através da soma das áreas de todo os cabos utilizados para realizar do clip, esta é exprimida em mm ² .
Splice	Identificação da disposição de cabos a soldar a sua secção total e individual.
Sticking	Adesão dos multifilares ao <i>tooling</i> devido a parâmetros de soldadura excessivos.
SUS	Soldadura por ultrassons.
Tooling	Elementos base da máquina que se encontram em contacto com os multifilares durante o processo de soldadura por ultrassons.

\overline{X}	Valor médio.
δ	Desvio padrão.
LSE	Limite superior da especificação.
LIE	Limite inferior da especificação.
C_{pk}	Índice de capacidade do processo.
Força _{max.}	Força máxima no ensaio de tração [N].
Força _{rot.}	Força rotura no ensaio de tração [N].
Extensão _{F. max.}	Incremento de extensão relativa a força máxima no ensaio de tração [mm].
Extensão _{rot.}	Incremento de extensão final do multifilar [mm].
$\varnothing_{fil.}$	Diâmetro do filamento de cobre [mm].
<i>Custo_{ar}</i>	Custo de ar comprimido [cêntimos/l].
<i>n_{soldaduras}</i>	Número de soldaduras por turno.
$\Delta_{consumo}$	Variação do consumo de ar comprimido em ambos os equipamentos [l].
<i>n_{turnos}</i>	Número de turnos.
<i>n_{ano}</i>	Numero de dia uteis anuais.
<i>Custo_{turno}</i>	Custo de implementação do equipamento B1 por turno [cêntimos].
<i>Custo_{anual}</i>	Custo de implementação do equipamento B1 por ano [€].
Altura _{equi.}	Altura medida pelo equipamento [mm].
Altura _{medida}	Altura medida com auxílio de um micrómetro [mm].
$\Delta_{Alturas}$	Diferença entre altura medida pelo equipamento e altura medida com o micrómetro [mm].
Largura _{equi}	Largura medida pelo equipamento [mm].
Largura _{medida}	Largura medida com auxílio de um micrómetro [mm].
$\Delta_{Largura}$	Diferença entre largura medida pelo equipamento e largura medida com auxílio do micrómetro [mm].

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO E OBJETIVO

A motivação para realização desta dissertação foi a familiarização com a tecnologia de ultrassons e oportunidade de primeiro contacto com o mundo empresarial numa empresa de nível mundial. Esta empresa possuía os equipamentos A1, A2 e A3 utilizados para o fabrico de cablagens automóveis através do processo de soldadura por ultrassons, sendo esta líder de mercado neste sector possui a necessidade contínua de inovação para manter esta posição.

No mercado de tecnologia para fabrico de cablagens através do processo de ultrassons surgiu um novo equipamento designado ao longo desta dissertação como B1, este equipamento foi testado e comparado com os equipamentos que atualmente a empresa possui verificando qual ou quais dos equipamentos se ajustava melhor aos requisitos do processo. Possibilitando a oportunidade de familiarização com a tecnologia, com o processo de soldadura por ultrassons para o fabrico de cablagens e de primeiro contacto com o mundo empresarial numa empresa de nível mundial.

Assim, o presente trabalho teve como objetivo avaliar qual dos equipamentos é mais apropriado para o processo de soldadura por ultrassons de fios de cobre. Com vista a cumprir este objetivo pretendeu-se:

- Analisar criticamente o processo de soldadura por ultrassons de cablagens de multifilares em cobre com diferentes diâmetros e número de fios diversos;
- Identificar os parâmetros de avaliação de processo com vista à sua otimização;
- Avaliar comparativamente a performance dos diferentes equipamentos existentes;
- Selecionar o equipamento ou os equipamentos mais adequados aos distintos requisitos na soldadura por ultrassons para produção de cablagens para a indústria automóvel.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação encontra-se segmentada em 6 capítulos e anexos, em que cada capítulo encontra-se estruturado do seguinte modo:

Capítulo 1 – Enquadramento do trabalho, objetivos, motivação e a estrutura do relatório.

Capítulo 2 – Enquadramento teórico dos materiais utilizados na produção de cablagens na indústria automóvel, tecnologias disponíveis para união de cabos de cobre, equipamentos e constituinte do um equipamento de soldadura por ultrassons.

Capítulo 3 – Descrição dos equipamentos, principais características e os seus intervalos de funcionamento, representação gráfica dos parâmetros de defeito de cada um dos equipamentos.

Capítulo 4 – Procedimento experimental de todos os testes realizados e motivo de realização de cada um dos testes.

Capítulo 5 – Resultados dos ensaios de caracterização do material, de parâmetros dos equipamentos, análise dos testes de estabilidade, verificação das medições dos equipamentos, teste de caracterização de soldabilidade de cada um dos equipamentos, contabilização dos tempos de manutenção e de arranque de ambos os equipamentos.

Capítulo 6 – Apresentação das conclusões do trabalho realizado e sugestões para trabalhos futuros.

2 ESTADO DE ARTE

2.1 MATERIAL UTILIZADO NA PRODUÇÃO DE CABLAGENS DA INDÚSTRIA AUTOMÓVEL

Os materiais mais utilizados para produção de cablagens na indústria automóvel são o alumínio, cobre e ligas de cobre. São utilizados estes materiais pois ambos têm uma condutividade elétrica elevada, quando comparada em função da área e do seu peso. O valor da condutividade elétrica do cobre e alumínio encontra-se na Tabela 2.1 [1].

Tabela 2.1 - Condutibilidade elétrica relativa e resistividade de alguns metais [2].[1]

Material	Condutibilidade elétrica relativa		Resistividade elétrica
	Por unidade de área de secção transversal	Por unidade de peso	[microhm-cm]
Cobre	100	100	1.6
Alumínio	61	201	2.6

Outro dos motivos para estes serem os materiais mais utilizados na cablagem para a indústria automóvel, é o facto de ambos terem uma estrutura cristalina cúbica de faces centradas (CFC), constituída por mais planos de escorregamentos ativos facilitando a deformação a frio [2-4].

O cobre é hoje o material mais utilizado apesar do alumínio apresentar uma condutividade equivalente e possuir metade do peso contudo possui, perto do dobro da área de passagem de corrente de eletricidade dobro relativamente ao cobre.

Nos últimos vinte anos o número de cablagens sofreu um aumento para mais do dobro, contudo a, área de passagem e acomodação de cabos não acompanhou essa tendência, tendo sofrido em muitos casos uma redução, essencialmente devido a limitações estruturais do chassi [5].

Por essa razão o foco desta dissertação é o cobre e as suas ligas, sendo apenas utilizada a liga de Cobre-Magnésio para a secção total de $0,13 \text{ mm}^2$, esta segue a norma de construção de fio ASTM B-105, para às restantes secções é utilizado cobre que obedece à norma DIN EN 13602 para construção de fio [6].

Não foi possível a consulta da norma ASTM B-105 pois a mesma não se encontrava disponível no IPQ.

A composição química do cobre utilizado, que segue a norma DIN EN 13602, encontra-se na Tabela 2.2. As propriedades mecânicas, térmicas e elétricas encontram-se na Tabela 2.3 [7-9].

Tabela 2.2 - Composição química do Cobre utilizado

Constituintes (%)			
Cu _{min}	Bi _{max}	O _{max}	Pb _{max}
99,9	0,0005	0,040	0,005

Tabela 2.3 - Propriedades do Cobre utilizado

Propriedades	Material	Cobre
Mecânicas	Tensão de rotura _{min} [MPa]	200
	Módulo de Young [GPa]	110
	Alongamento [%]	>16
Térmicas	T fusão [°C]	860-1200
Elétricas	Resistividade _{20°C} [mΩ]	19,1

2.1.1 Configurações de ligações de fio possíveis

Para a produção de cablagens destinadas à indústria automóvel são possíveis duas configurações de união de fio. A configuração em que todos os fios se encontram do mesmo lado, denominado “clip de geometria cega” representado na Figura 2.1 (A) e a configuração constituída por fios de ambos os lados denominado “clip de geometria cruzada” representado na Figura 2.1 (B).

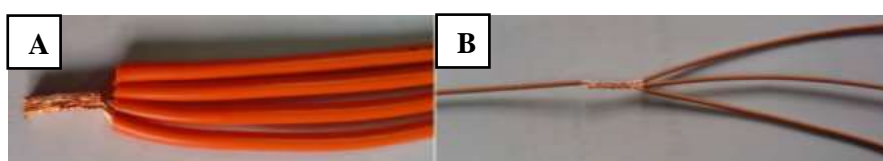


Figura 2.1 - Clip de geometria cega e geometria cruzada

2.2 PROCESSOS DE LIGAÇÃO

Existem 3 formas de classificar um processo quanto a sua a sua energia de ativação, dependente de energia:

- Mecânica → A energia é fornecida na forma de pressão e em alguns processos temperatura, mas nunca ultrapassando a temperatura de recristalização do material;
- Termomecânica → processo ao qual é fornecida pressão e energia e a soldadura ocorre entre a temperatura de cristalização/fusão do material;
- Térmica → Pode ou não ser fornecida pressão, contudo a temperatura para a qual ocorre a ligação é sempre superior ou igual à temperatura de fusão do material.

Atualmente, para a indústria da cablagem automóvel os processos utilizados para união de cablagens são cravamento (ativação mecânica) e o processo de união através da tecnologia de ultrassons (ativação termomecânica), ambos representados na Figura 2.2.

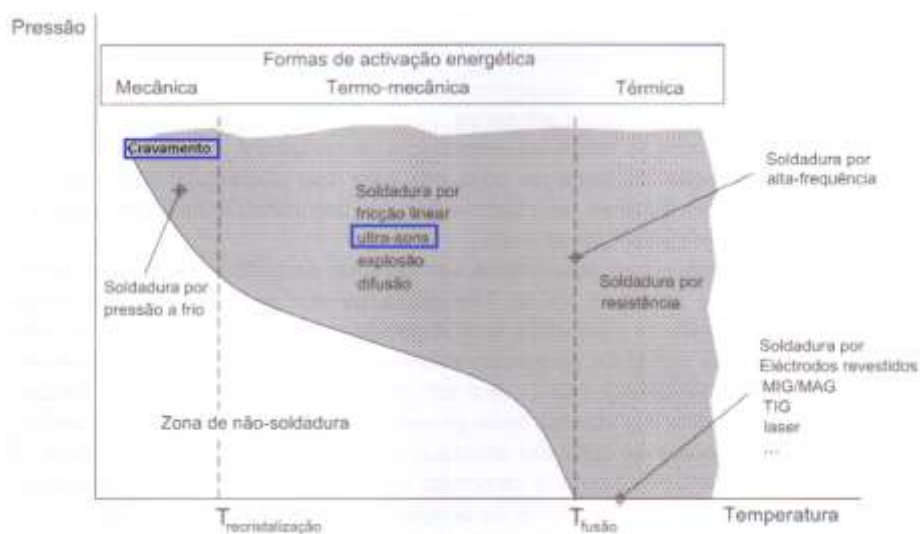


Figura 2.2 - Formas de ativação energética dos processos de ligação (Adaptação da Figura 1.27 do livro [4])

2.2.1 Cravamento (processo Mecânico)

O cravamento é um processo de deformação plástica a frio da qual resulta a união de dois corpos, fio e terminal [9-10]. É o mais utilizado na indústria de conectividades de fio verificando-se, nos últimos anos um aumento da sua aplicação devido ao aumento de funcionalidade dos automóveis [11].

É um processo baseado na deformação plástica na interface entre as duas peças a unir e em que a qualidade da superfície é determinante para o sucesso do processo nomeadamente a rugosidade e limpeza da superfície [10].

Equipamento

Na Figura 2.3 pode observar-se os constituintes gerais de um equipamento de cravamento de terminais. Este é constituído por uma bobina de alimentação (1), o compressor que alimenta a prensa (2) e o módulo de cravamento (3) [12].



Figura 2.3 - Komax bt 722 [12]

Na Figura 2.4 encontram-se as peças do módulo de cravamento que estão em contacto com os terminais durante o processo.

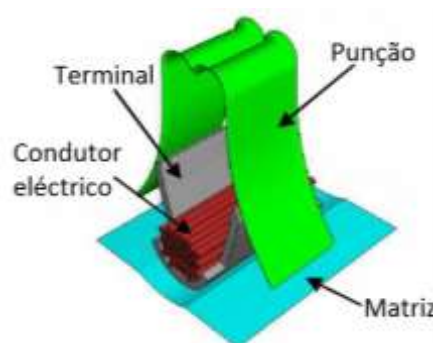


Figura 2.4 - Peças de interação no cravamento [11]

Processo

O cravamento é um processo semiautomático, em que a alimentação dos terminais é automática e a alimentação do fio é efetuada pelo operador.

O processo de cravamento é acionado por um sensor ou pelo pedal do operador. Nesse momento a prensa inicia o movimento de descida, promovendo o contacto entre o terminal e o

punção como representado na Figura 2.5. O terminal e o condutor vão ser deformados plasticamente [10], originando a forma hexagonal do condutor, representado na Figura 2.6.

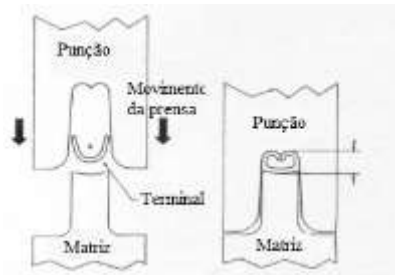


Figura 2.5 - Movimento de cravamento [23]



Figura 2.6 - Cravamento união terminal condutor [11]

Controlo do processo

A integridade da ligação é assegurada através da conjugação dos pelos seguintes parâmetros de cravamento: altura, largura e deformação [10].

Na indústria, os parâmetros considerados mais relevantes são: a altura e a força de cravamento.

Estes parâmetros controlam a condutividade e a capacidade que o cravamento terá de resistir aos esforços [23].

2.2.2 Soldadura por ultrassons (processo Termomecânico)

A soldadura por ultrassons surgiu na década de 50 do século XX na tentativa de aplicar ultrassons a uma soldadura por pontos e verificou-se que a soldadura ocorria antes da passagem de corrente elétrica [14].

A soldadura de ultrassons é um processo de ligação de materiais que ocorre no estado sólido, sem adição material [18]. Para a realização desta ligação entre superfícies é necessário exercer uma pressão baixa (pressão que evita o escorregamento do material) e fornecer uma vibração de elevada frequência durante um curto período de tempo [18,19]. Essa vibração é fornecida segundo o plano das superfícies de contacto [15,17,18], funcionando na gama

compreendida entre 20 kHz e os 60 kHz [16], sendo 20 kHz a frequência mais comum para a união de metais [15,17]. A grande deformação plástica gerada por essa oscilação origina a quebra e dispersão dos óxidos superficiais criando um aumento da área de metal puro em contacto, sendo determinante a limpeza e a rugosidade da superfície [19,22].

Este é um processo utilizado no fabrico de cablagens para indústria automóvel e aviação pois consiste num processo que requer uma baixa energia, gerando por isso temperaturas não muito elevadas na zona de soldadura e executando-se de forma rápida [19].

2.2.2.1 Ligação por ultrassons

A soldadura por ultrassons é o processo de coalescência entre átomos das superfícies a soldar, ou seja, quer distância quer as forças de atração interatômicas entre os átomos da ligação são semelhantes às do material base [42].

As ligações geradas deste tipo de soldadura podem classificar-se como sendo: adesão metálica, representadas na Figura 2.7. (A) e difusão no estado sólido, representada na mesma figura (B). É possível observar pontos de concentração dos óxidos partidos nessa mesma figura (C) [20,37].

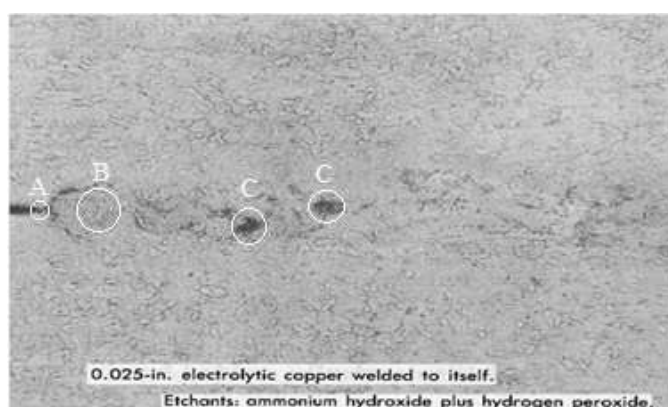


Figura 2.7 - Ligação por adesão e difusão [20]

A zona de difusão é uma zona onde ocorre a difusão do material superior com o material inferior, esses pontos são denominados de ilhas de soldadura, sendo essas ilhas de soldadura os pontos mais fortes da ligação por ultrassons [15,21,22]

A energia de vibração é transmitida de superfície em superfície, sendo que em cada interface é absorvida uma parte para a deformação plástica superficial, chegando menos energia à superfície superior. É devido a este efeito que, quando perante múltiplas superfícies a soldar, como é o caso da indústria das cablagens, os pontos de ligação mais fracos serão sempre os pontos de ligação superiores [16]. É possível observar este efeito na Figura 2.8.

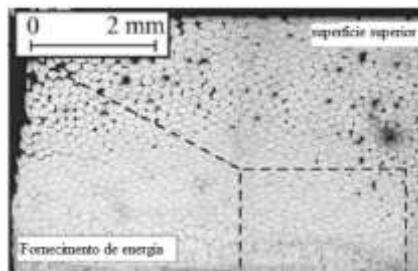


Figura 2.8 - Transmissão de energia através dos multifilares de cobre [16]

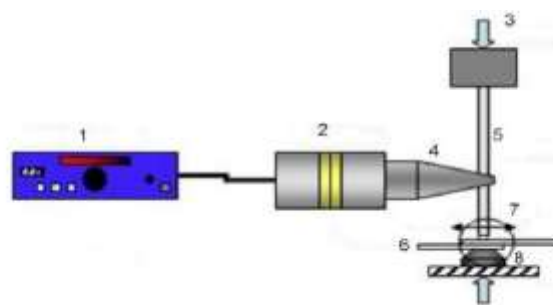
2.2.2.2 Equipamento

Os principais constituintes de um equipamento de soldadura por ultrassons são:

- Um mecanismo que segure e exerça pressão entre peças a soldar.
- Um mecanismo que forneça energia vibratória a uma das peças a soldar.
- Um mecanismo que gere a energia vibratória.
- Um circuito que controle o tempo de aplicação, de pressão e energia vibratória.

Para a soldadura do tipo por pontos utilizada na indústria das cablagens existem dois tipos de equipamentos convencionais [20,22,37], o sistema cunha-lingueta, *Wedge-reed*, representado na Figura 2.9 e o sistema Lateral-Drive, representado na Figura 2.10.

O sistema *Lateral Drive* é utilizado para a soldadura de cablagens pois este permite que a amplitude seja definida pelo operador [22]. Tal opção não existe no sistema cunha-lingueta, pelo facto da amplitude desta depender da flexão da lingueta (reed), sendo um sistema utilizado em equipamentos de elevada potência [20] .



- | | |
|--------------------------|-------------------------------|
| 1 - Fonte de potência | 5 - Linguete (reed)/sonótrodo |
| 2 - Transdutor/Conversor | 6 – Material a unir |
| 3 – Força normal | 7 – Direcção de vibração |
| 4 – Cunha (wedge) | 8 – Bigorna |

Figura 2.9 - Equipamento de soldadura por ultrassons *Wedge-reed* [22]

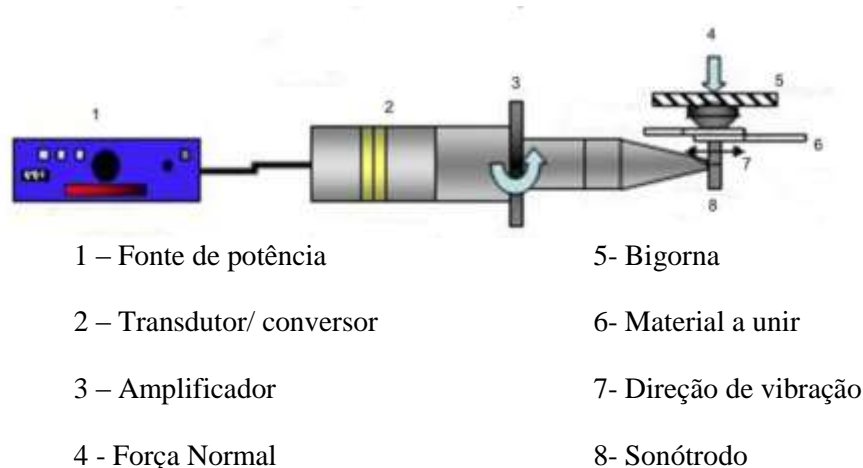


Figura 2.10 - Equipamento de soldadura por ultrassons *Lateral Drive* [22]

A transformação de energia elétrica fornecida pela rede, em energia mecânica (vibração) ocorre como esquematizado na Figura 2.11. A energia é fornecida pela rede pública com uma frequência de 50 ou 60 Hz. A fonte de potência recebe essa energia, converte-a para a frequência de 20 kHz e transfere-a para o conversor que transforma a energia elétrica a 20kHz em energia mecânica (vibração) na mesma frequência. A vibração passa para o amplificador que aumenta reduz ou mantém a amplitude, passando-a posteriormente ao sonótrodo que aumenta a amplitude e a transfere para o material a soldar.

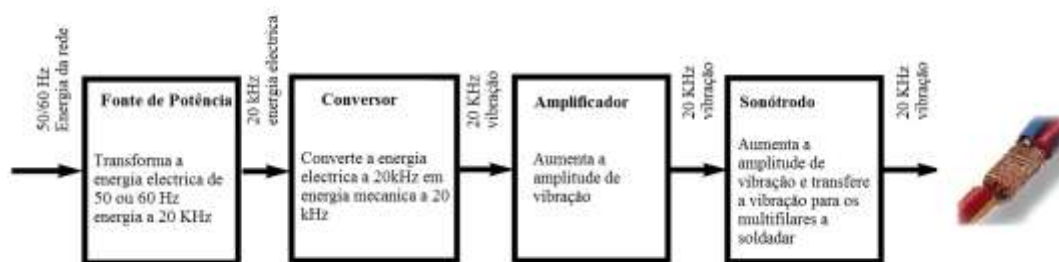


Figura 2.11 - Esquema de transformação de energia elétrica em vibração

Fonte de potência

A fonte de potência tem como função transformar a energia da rede que se encontra à frequência de 50 ou 60 Hz, em energia elétrica com frequência de 20 kHz [20,26]. Esta encontra-se normalmente separada do conjunto conversor, amplificador e sonótrodo, no entanto ligada a estes através de um cabo coaxial.

Conversor/transdutor

O conversor ou transdutor recebe o sinal elétrico da fonte de potência à frequência de 20 kHz e converte-o em vibração mecânica à mesma frequência, podendo ser um de dois tipos magnetostrictivo ou piezoelétrico [20, 23, 28, 31].

O conversor magnetostrictivo é constituído por uma estrutura de chapas de níquel empilhadas, que variam em comprimento consoante fluxo magnético que as atravessa. Estes conversores são capazes de trabalhar durante longos períodos de tempo, tendo uma eficiência energética de 55-60% [20,26].

O conversor piezoelétrico é construído em materiais cerâmicos como o titanato zirconato de chumbo [27,31] que variam de dimensão quando sujeitos a uma corrente elétrica variável e possuem uma eficiência energética de 90-96% [26]. Encontram-se representados esquematicamente cada um dos conversores na Figura 2.12.

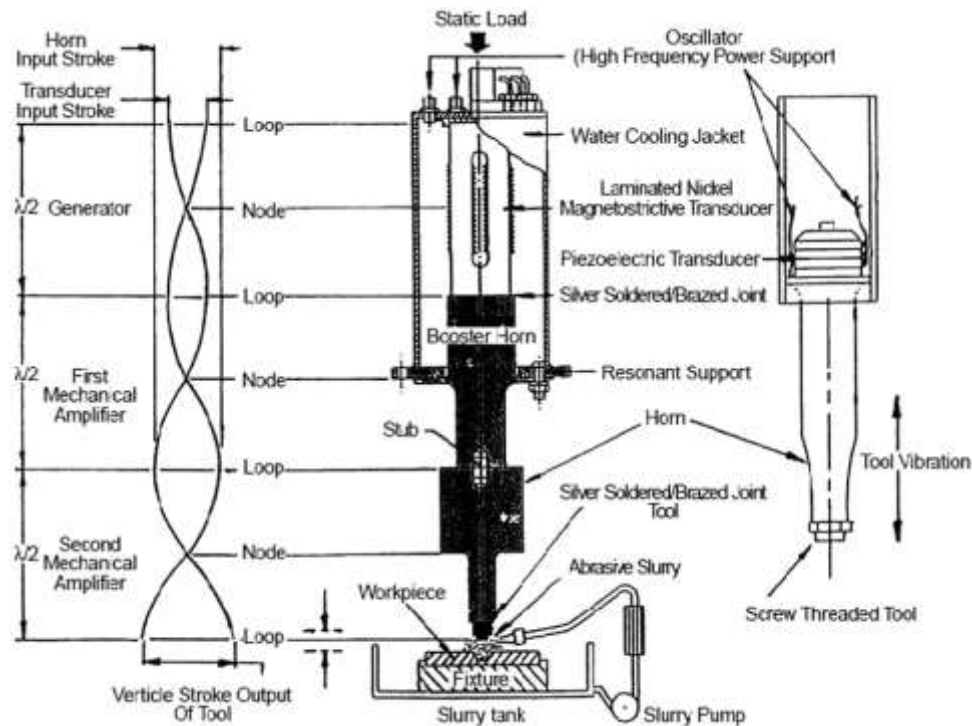


Figura 2.12 - Transdutor magnetostrictivo e piezoelétrico [26]

Ambos os transdutores possuem um sistema de arrefecimento para não existirem alterações das suas características durante o ciclo de trabalho [23]. O conversor utilizado pelos equipamentos de ultrassom para as soldaduras das cablagens na indústria automóvel é o piezoelétrico por serem mais eficientes e compactos e permitirem uma maior intensidade de vibração comparativamente aos magnetostrictivos [26].

Amplificador

O material do amplificador é o titânio ou alumínio são utilizados estes materiais por resistirem aos esforços de fadiga a que este vai estar sujeito. No equipamento de soldadura por ultrassons este encontra-se montado entre o sonótrodo e o transdutor, como é possível observar na Figura 2.13, e tem a função de aumentar, diminuir ou manter a amplitude de vibração [22] podendo esse ganho variar entre 0,5:2,5.

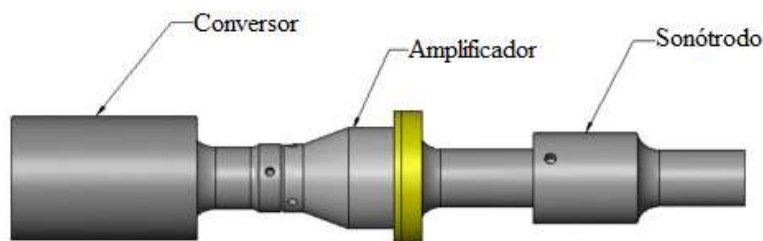


Figura 2.13 - Esquema de conversor, amplificador e sonótrodo

O amplificador possui um anel que constitui um ponto de vibração neutra é por isso um ponto de apoio e fixação num equipamento de ultrassons resistindo aos esforços durante o processo de soldadura [22].

Tooling

Designa-se por *tooling* o conjunto de todos os componentes que se encontram em contacto com os multifilares de cobre durante a soldadura. Este deve de possuir elevada dureza para suportar os esforços das inúmeras soldaduras que vai realizar durante o seu ciclo de vida, ter boa tenacidade para evitar a fractura do mesmo, possuir uma elevada resistência a temperaturas elevadas e apresentar uma baixa condutividade térmica para não afetar a qualidade das solduras. Tipicamente todos os constituintes do *tooling* são de aço ou de uma liga de titânio [14,20,26].

Sonótrodo

O sonótrodo é uma ferramenta que se encontra ligada ao amplificador ou ao transdutor. A sua função consiste em aumentar a amplitude de vibração recebida e transmiti-la aos materiais a soldar [26,34]. A superfície do sonótrodo que se encontra em contacto com o material a soldar apresenta a forma de múltiplas pirâmides ou ondas paralelas de modo a garantir uma indentação do material, que irá promover uma melhor transmissão da vibração para o material a soldar sem que exista escorregamento entre o sonótrodo e o material [23]. Na

soldadura de cablagens utiliza-se o sonótrodo com a ponta constituída por múltiplas ondas uma vez que, a configuração de pirâmides não permitia a definição de largura de soldadura nos equipamentos utilizados.

O sonótrodo é um elemento que é projetado para que a sua frequência natural seja igual a frequência emitida pela fonte de potência [30], sendo construído numa liga de alumínio, titânio ou aço inox para lhe conferir uma elevada resistência a fadiga [26,30,33]. A frequência normal de um equipamento de soldadura por ultrassons é de 20kHz, necessitando este de resistir a 20 000 ciclos de tração-compressão por cada segundo que durar a soldadura [26,33,34].

Bigorna

A Bigorna, ao contrário do sonótrodo, é projetada de modo a ser um elemento anti-ressonante com o intuito de evitar a transmissão de energia através da mesma, obrigando assim à concentração de energia nos materiais a soldar [32].

A bigorna é um elemento cuja face superior e inferior são iguais permitindo assim a utilização da outra face da bigorna quando uma se encontra desgastada. Este componente desloca-se na horizontal sobre calhas que se encontram lubrificadas e aplica pressão nos multifilares a soldar, sendo pressão e deslocação ambas alimentadas através de um sistema hidráulico ou pneumático, utilizando-se o sistema hidráulico apenas em equipamento de elevada potência [20,35].

À semelhança do sonótrodo, esta possuiu uma superfície de ondas paralelas, no entanto, nos equipamentos B1, A2 e A3 a onda central da bigorna é superior às outras de modo a proporcionar uma maior compactação nessa zona, no entanto verificou-se que essa compactação para soldaduras de baixa secção prejudica a soldadura pois na zona da onda central gerava um excesso de compressão provocando uma extrusão do material prejudicando os resultados nos ensaios destrutivos do teste de *Peeling* pois o que se verificava era a quebra da ligação soldada antes da onda central.

Placa de retoque

A placa de retoque tem a função de definir a largura da soldadura. Esta move-se verticalmente em conjunto com a bigorna devendo garantir-se que, a folga entre esta e o sonótrodo é a mínima possível. De modo que não ocorra a fuga do material a soldar para essa folga, é necessário garantir que quando se fornece a vibração não existe contacto entre esta e o sonótrodo [35].

Garra deslizante

A garra deslizante move-se horizontalmente sobre as ondas do sonótrodo, e em conjunto com a placa de retoque define a largura da soldadura. Este elemento é acionado mecanicamente possuindo um mecanismo de sem fim que define o ponto de paragem da garra, tornando este equipamento muito preciso na medição da largura do clip. Esta ferramenta possui um revestimento que permite reduzir o seu desgaste, evita a adesão de alguns materiais à ferramenta e aumenta o seu período médio de vida [14].

2.2.2.1 Parâmetros de soldadura ultrassons

Os parâmetros importantes num processo de soldadura por ultrassons [24,29,32]:

- Pressão;
- Frequência de vibração;
- Amplitude;
- Energia elétrica;
- Tempo de soldadura;

Pressão

A pressão tem influência direta na deformação plástica do material, pois é a pressão que promove o contacto entre a superfície e, em conjunto com a energia de vibração origina a quebra dos óxidos superficiais do material a soldar [24] .

As pressões insuficientes levam a que ocorra o deslizamento entre o sonótrodo e os multifilares que se encontram em contacto com este, gerando um aquecimento e desgaste do sonótrodo [37].

No que toca a pressões excessivas, estas geram uma deformação plástica excessiva do material a soldar, da qual resulta uma redução da área e uma diminuição da resistência mecânica [35]. O excesso de pressão aumenta da potência necessária para a realização da soldadura [37], responsável por um dos defeitos visuais, a formação de rebarba e, pode originar a colagem do clip ao sonótrodo[37].

É importante definir corretamente o valor de pressão aplicável, sendo sugerido iniciar a otimização com uma pressão baixa [23].

Frequência

A frequência do equipamento é uma característica do mesmo e depende da capacidade que a fonte de potência tem de transformar os 50 ou 60 Hz numa frequência superior. A fonte de potência é construída de modo que a frequência produzida seja igual à ressonância para a qual o sonótrodo se encontra afinado [23].

Amplitude

A amplitude está diretamente relacionada com a potência. Pelo facto da frequência do sistema se encontrar fixa, só se poderá aumentar a amplitude de vibração aumentando a entrega energética para que esta percorra uma distância maior no mesmo intervalo de tempo [23]. A amplitude deve ser adequada à secção a soldar, utilizando-se amplitudes mais baixas para secções pequenas e amplitudes mais elevadas para secções maiores. Amplitudes baixas implicam um aumento do tempo de soldadura e podem não gerar uma ligação por difusão devido ao amortecimento natural do material a soldar. As amplitudes elevadas geram deformações plásticas superiores e um maior aumento de temperatura na zona de interface [38]. A Figura 2.14 permite constatar estes fenómenos de aumento do tempo com a redução da amplitude bem como o aumento da temperatura na interface para uma amplitude superior.

A amplitude facilita os processos difusivos e a coalescência dos pontos de soldadura, reduz o tempo de soldadura para uma boa união e tem um papel preponderante no aumento da resistência mecânica dos clips [23].

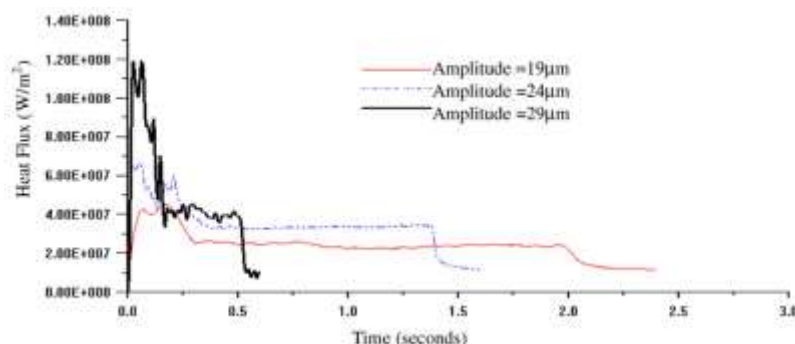


Figura 2.14 - Tempo de soldadura aumenta em função da amplitude [38]

Energia

A energia necessária para realizar a soldadura por ultrassons depende do material e da sua secção. Quanto maior a dureza do material a soldar maior é a energia necessária para soldar uma secção com a mesma dimensão [17,20].

A energia no processo de soldadura por ultrassons tem como função aumentar e gerar a coalescência das superfícies em contacto através da deformação plástica superficial. Se a energia fornecida for baixa, gera a ligação por adesão, ou seja, uma ligação muito fraca quando comparada com a ligação por difusão. Caso seja fornecida energia em excesso, gera-se o fenómeno de extrusão do material, distorção da soldadura, redução da secção transversal e, por vezes o fenómeno de *sticking*. Estes fenómenos descritos justificam a redução da resistência mecânica [15].

Na Figura 2.15, na qual cor representa um tipo de bigorna, é possível observar que existe um patamar energético a partir do qual o incremento de energia não gera um aumento da resistência mecânica da soldadura.

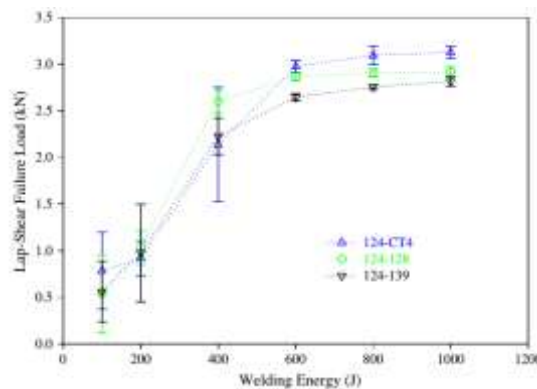


Figura 2.15 - Influência da energia no incremento da resistência mecânica utilizando vários tipos de bigorna [15]

Tempo de soldadura

No processo de ultrassons, os tempos de soldadura são caracteristicamente muito curtos e dependem dos parâmetros utilizados pois, o tempo de soldadura nos equipamentos de ultrassons depende da energia e da potência. Assim, potências elevadas e tempos curtos de soldadura proporcionam normalmente melhores resultados, enquanto tempos de soldadura elevados provocam aquecimento da soldadura e por isso um pior acabamento superficial [23].

No entanto, para efetuar uma otimização de parâmetros de equipamentos de soldadura por ultrassons, o foco deve de ser a pressão, amplitude e o tempo de soldadura [36].

2.2.2.2 Parâmetros do material

Os parâmetros mais importantes do material são [22]:

- A condição superficial.
- A estrutura cristalina.
- A dureza.
- As dimensões.

A condição superficial é importante pois numa ligação tudo o que se encontra à superfície do material ficará difundido na ligação. Relativamente à estrutura cristalina e à dureza, sabe-se que têm uma grande influência na deformação plástica superficial do Cobre. As dimensões exteriores têm influência nos parâmetros que são fornecidos ao equipamento para este realizar a soldadura [17,22].

2.2.2.3 Controlo do processo

Na indústria de produção de cablagens através do processo de ultrassons são efetuados três tipos de controlo de qualidade do processo: controlo visual, de condutividade elétrica e de resistência mecânica [29] .

Controlo Visual

No controlo visual, após a realização de cada soldadura, o operador observa se o clip não possui rebarba lateral, verifica se não foram arrancados multifilares durante o processo de soldadura e, constata se existe uma união de ambos os materiais ao longo da área de soldadura [29].

Condutividade elétrica

No momento em que todas as soldaduras tiverem sido efetuadas e, se a cablagem passar no controlo visual, realiza-se o teste para verificar se existe passagem de corrente de uma extremidade à outra do cabo, assim como a todas as ramificações.

Resistência mecânica

O controlo da resistência mecânica é realizado através de ensaios destrutivos, utilizando um equipamento que realiza um ensaio de tração uniaxial com velocidade constante, medindo assim a força máxima necessária para provocar a rotura da zona de soldadura. Neste equipamento realizam-se 2 tipo de testes:

O teste em que se analisa a resistência de todos os pontos da soldadura quando sujeitos a uma força de corte, denomina-se teste de pull e encontra-se representado na Figura 2.16 com a letra A [39]. O teste que analisa a resistência máxima dos pontos da ligação por unidade de largura soldada é denominado de teste de *peel*, e está devidamente representado na mesma figura com a letra B, sendo este último o que apresenta piores valores [37] .

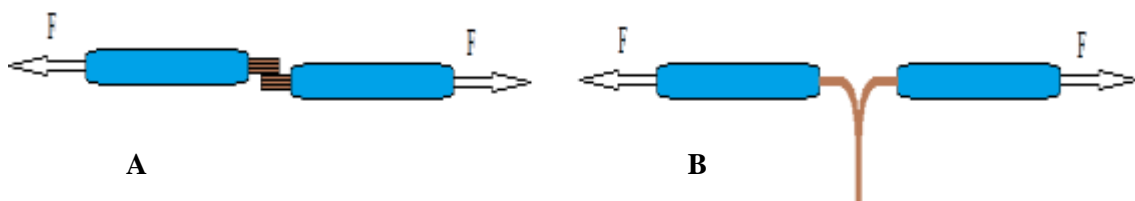


Figura 2.16 - Ensaios Pull e Peel

É importante frisar que, em qualquer um destes testes o fio que traciona é sempre o fio que se encontra no topo da soldadura. Assim, este cabo será o que recebeu menor energia vibratória e, o cabo de menor secção será o ponto mais fraco da ligação, ou seja, se este último estiver bem soldado todos os outros também estarão [23,35].

O controlo da resistência mecânica é efetuado diariamente em todas as fábricas antes do início da produção.

2.2.2.4 O controlo estatístico da qualidade

Na indústria de produção de cablagens não existem duas unidades do mesmo produto exatamente iguais. Apesar de serem mantidos os parâmetros, existem sempre ligeiras variações devido a pequenas diferenças de posicionamento dos fios e, pelo facto do fio não ser exatamente igual ao longo de toda a bobina [23] .

Para o controlo estatístico do processo recorre-se aos índices da capacidade sendo os mais comuns na indústria o C_p e o C_{pk} , estes são calculados a partir das eq. 2.1 e 2.2, utiliza-se C_p quando se pretende limitar o processo e bilateral e o C_{pk} quando a limitação é unilateral 0 [40]. A empresa utiliza C_{pk} pois pretende sempre que os valores de força se encontrem acima do limite inferior da especificação logo a eq.2.2 pode ser rescrita de acordo com a equação eq. 2.3 [41].

$$C_p = \min\left(\frac{LSE - LIE}{6\delta}\right) \quad (2.1)$$

$$C_{pk} = \min\left(\frac{LSE - \bar{X}}{3\delta}, \frac{\bar{X} - LIE}{3\delta}\right) \quad (2.2)$$

$$C_{pk} = \frac{\bar{X} - LIE}{3\delta} \quad (2.3)$$

Para o cálculo do C_{pk} realizam-se ensaios destrutivos a um número significativo de ligações superiores a 50 amostras, a partir dos quais é retirada a força necessária para a rotura da soldadura, calculando-se a média (\bar{X}) e desvio padrão (δ). O LIE é um valor especificado pela empresa e depende da área de secção do multifilar que se encontra a ser tracionado.

Como critério de qualidade, a empresa exige sempre que o C_{pk} seja superior a 1,66, implicando que a taxa de rejeição seja de 0,6 soldaduras por milhão.

2.2.2.5 Fatores que influenciam o controlo do processo

Os principais fatores que influenciam o controlo do processo são: o fator humano, a condição do fio, a calibração e o desgaste dos equipamentos.

O fator humano é um dos fatores mais determinantes uma vez que, dificilmente o operador de uma máquina de ultrassons consegue colocar os fios exatamente na mesma posição para garantir uma maior homogeneidade de resultados. Esta é uma situação crítica pois os fios devem ser colocados em pilha na vertical e, perante um grande número de fios a unir há tendência destes rolares para um dos lados devido à grande largura de soldadura, ou seja, dificilmente terão a mesma posição final em 2 soldaduras consecutivas. O posicionamento correto de fio segue uma regra específica com o objetivo de estabilizar os valores. Segundo a regra, o fio de secção superior é colocado mais próximo do sonótrodo e empilhados na vertical. Quando a altura da pilha for superior à distância entre o sonótrodo e a bigorna, cria-se uma nova pilha ao lado desta.

A condição do fio também tem uma grande importância pois o fio não é igual ao longo de toda a bobina. Durante o desnude do revestimento podem ser arrancados ou cortados multifilares e a superfície do fio pode ser contaminada pelo amaciante do revestimento, por passagem deste ao estado líquido devido ao efeito do calor.

A calibração dos equipamentos é um dos fatores de grande relevância pois exige uma grande destreza por parte do operador, sendo que, quanto maior a sua destreza, melhor a calibração do equipamento.

O desgaste das ferramentas gera um maior escorregamento entre as peças e o *tooling* levando consecutivamente a uma maior dispersão de valores.

2.2.2.6 Vantagens do processo de soldadura por ultrassons

É um método que não necessita de fluxo de calor ou material de adição [20,29,32] e proporciona elevada resistência quando efetuado corretamente, assemelhando-se neste ponto ao material base [18,29]. Apresenta uma baixa resistência elétrica na zona de soldadura [20,29], permite uma alta repetibilidade [29] e controlo automático do processo [29], evita empenos, contração ou distorção na vizinhança da zona de soldadura [18]. Esta zona não necessita de limpeza da superfície para remover os óxidos por serem partidos e diluídos na soldadura durante o processo [20].

O processo de soldadura por ultrassons permite ainda ligar diferentes espessuras de material [18], sendo considerado um processo de ligação extremamente rápido e de custo mediano [19].

3 CARATERIZAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS EM ESTUDO

3.1 INTRODUÇÃO

Todos os equipamentos utilizados neste estudo, sugerem parâmetros *standard* designadamente, de pressão, amplitude, largura de soldadura e energia utilizada, em função da secção que se pretende soldar. Os parâmetros de defeito são definidos pelos fabricantes de equipamento de SUS para Cobre puro e seguem um algoritmo que utiliza uma base científica e estudos realizados pelo fornecedor. Estes parâmetros devem ser ajustados em função do tipo de fio a utilizar para a obtenção de melhores resultados nos ensaios destrutivos.

Ambos os equipamentos possuem 2 modos de funcionamento: o modo set up e modo de produção. No modo de set up, estabelecem-se manualmente a pressão, energia, amplitude e largura de soldadura partindo dos parâmetros propostos pelo equipamento e otimizando quando necessário de modo a melhor o valor das forças nos ensaios destrutivos. Além disso, são definidos os valores das janelas de qualidade de modo a garantir que é detetada ausência de uma percentagem de multifilares.

No modo de produção não é possível ajustar nenhum dos parâmetros, sendo este o modo utilizado em produção.

3.2 CARACTERÍSTICAS DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Todos os equipamentos utilizados funcionam à frequência de 20kHz e possuem uma fonte de alimentação de 3000 W. Os parâmetros utilizáveis nos diferentes equipamentos encontram-se Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Parâmetros utilizáveis dos diferentes equipamentos.

Equipamentos	A1	A2/A3	B1
Parâmetro	Valor (min.-max.)		
Energia [J]	0-9999	0-9999	0-5000
Pressão [bar]	0,0-6,0	0,0-6,0	0,0-7,0
Amplitude [%→mm]	50-100→0,013-0,027	50-100→0,013-0,027	50-100→0,013-0,027
Largura [mm]	0-8,25	0-8,25	0,00-10,30

As janelas da qualidade no equipamento B1 são definidas em função da altura inicial e final. Nos equipamentos do fornecedor A as janelas de qualidade variam segundo uma tabela intrínseca do equipamento e estas variam em função da secção a soldar. Em ambos os equipamentos é possível alterar o valor das janelas para cumprir os requisitos de qualidade impostos pelo cliente.

O número de ondas do equipamento B1 é igual ao número de ondas dos equipamentos A2/A3 possuindo também uma largura de soldadura semelhante (largura do sonótrodo e bigorna). No equipamento A1 foi reduzida a largura de soldadura e aumentado o número de onda neste equipamento as ondas possuem curvatura superior de modo a aumentar a área de contacto com os multifilares. É possível observar a geometria das ondas das diferentes bigornas na Figura 3.1.

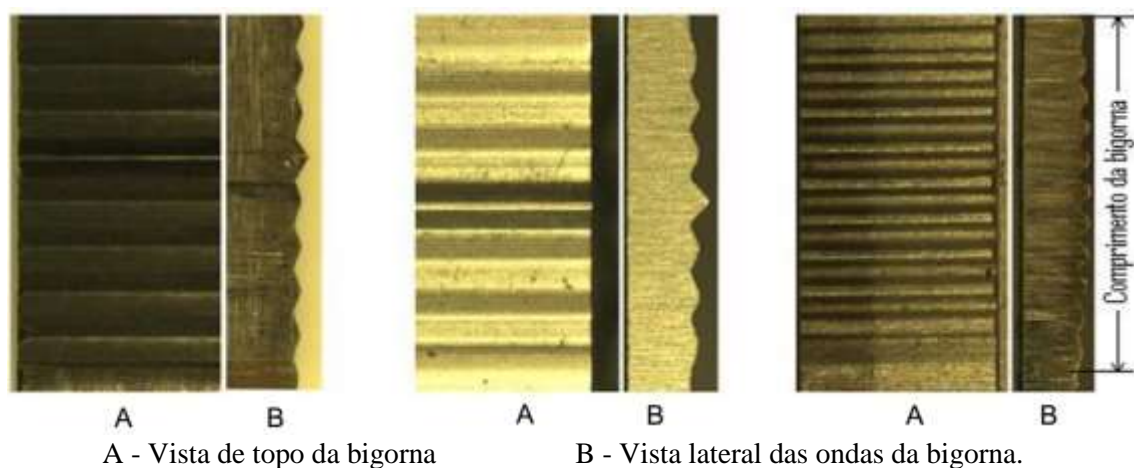


Figura 3.1 - Sistema de ondas da bigorna dos equipamentos B1, A2 e A1 [35]

O amplificador nos equipamentos do fornecedor A possui a função de ponto de fixação do *tooling* e de passagem da vibração uma vez que, o rácio de amplificação é de 1 para 1. Existe também uma diferença no conversor, sendo que o conversor do equipamento B1 possui 5 cristais piezoelétrico, enquanto os equipamentos do fornecedor A possuem 6 cristais. Apesar de possuírem esta diferença de cristais não existe influência na amplitude de vibração.

O arrefecimento do equipamento B1 é por sopro de ar comprimido, enquanto nos equipamentos A1 e A3 existe um ventilador colocado na superfície inferior forçando o ar a passar pelo *tooling*. O equipamento A2 é um equipamento antigo cujo projeto não teve em consideração a refrigeração do mesmo.

A calibração e ajuste do *tooling* nos equipamentos do Fornecedor A demoram, por norma, aproximadamente 20 minutos, no B1 a calibração e ajuste são automáticos demorando cerca de 30 segundos.

A Tabela 3.2 contém a informação sintetizada das características de cada um dos equipamentos.

Tabela 3.2 - Tabela de comparação das características dos diferentes equipamentos			
Característica	B1	A2/A3	A1
Número de ondas do sonótrodo/bigorna	9	9	11
Comprimento da zona de soldadura [mm]	12,0	12,0	9,0
Onda central na bigorna	Sim	Sim/Sim	Não
Número de faces utilizáveis no sonótrodo	2	2	2
Número de faces utilizáveis na bigorna	4	2/2	2
Número de faces utilizáveis da garra deslizante	2	2/2	2
Número de faces utilizáveis da placa de retoque	2	1	1
Amplificador	Sem amplificador	1:1	1:1
Número de cristais piezoeléctrico	5	6 / 6	6
Arrefecimento do <i>tooling</i>	Arrefecido por sopro de ar comprimido	Não arrefecido/arrefecido por ventoinha “ <i>fan</i> ”	Arrefecido por ventoinha “ <i>fan</i> ”
Tipo de Calibração	Calibração automática em cada arranque da máquina	Calibração manual	Calibração manual
Tempo de calibração (min.)	0,5	20	20
Janela de qualidade	Definidas em função da percentagem de altura final e inicial	Definidas em função da secção estando definidas por intervalos de secção	Definidas em função da secção estando definidas por intervalos de secção

3.3 CURVAS DE FUNCIONAMENTO DOS DIFERENTES EQUIPAMENTOS

Analisado a evolução da energia aplicada à soldadura para as diferentes secções representada na Figura 3.2, verifica-se que a energia proposta pelo equipamento B1 é superior até a secção de 10 mm², sendo superada a partir dessa secção pelo equipamento A3.

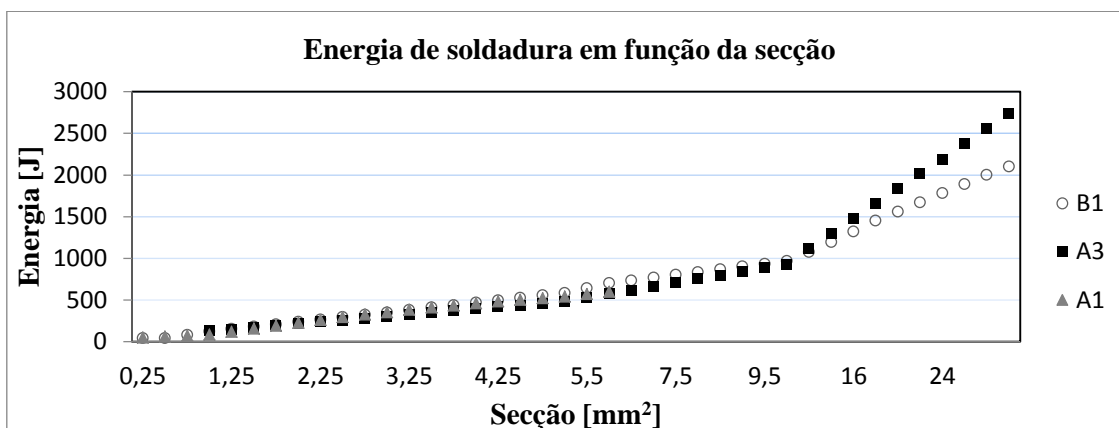


Figura 3.2 – Variação da energia de soldadura com a secção a soldar

Analisado a evolução da pressão aplicada à soldadura dos multifilares de cobre para as diferentes secções representado na Figura 3.3 verifica-se que para secções até 1,75 mm², a pressão proposta pelo equipamento B1 é superior aos outros equipamentos, sendo esse valor superado pelo equipamento A1 nas secções superiores a 1,75 mm². No entanto o valor de pressão sugerido pelo equipamento B1 é sempre superior ao sugerido pelo equipamento A3.

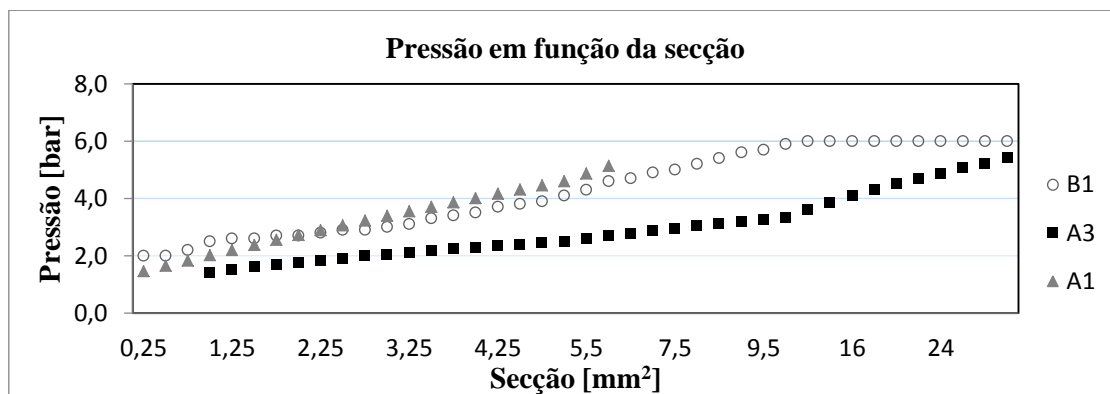


Figura 3.3 – Variação da pressão aplicada a soldadura com a secção a soldar

Analisando a evolução da amplitude de vibração presente na Figura 3.4, permite verificar que a amplitude proposta pelos equipamentos A1 e A3 é sempre superior à amplitude proposta pelo equipamento B1.

A amplitude no equipamento A1 aumenta de forma linear atingindo o patamar de amplitude máxima para a secção de 2,5 mm², a partir desse valor e até a secção de 6 mm² esta

sugere sempre uma amplitude de 100%. No equipamento A3 a amplitude encontra-se definida por intervalos de secção assemelhando-se a sua curva ao degrau de uma escada, esta atinge o seu máximo de amplitude para a secção de 6 mm², sugerindo o valor de 100% de amplitude para secções superiores as 6 mm².

A curva da amplitude sugerida pelo equipamento B1 evolui linearmente até à secção de 3 mm², sendo que a partir desse valor a curva passa a evoluir por intervalos de secção é de notar que o equipamento B1 sugere uma amplitude menor que os equipamentos A1 e A3 e que este nunca sugere a sua amplitude máxima. Este equipamento possivelmente nunca sugere a amplitude máxima para aumentar a durabilidade do seu sonótrodo e para reduzir o número de *loops* dos multifilares.

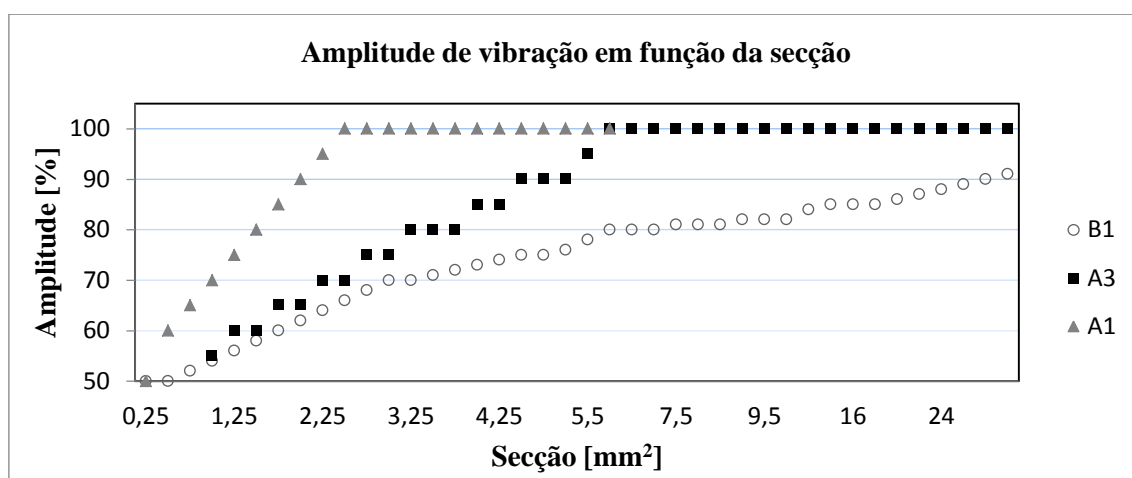


Figura 3.4 – Evolução da amplitude de vibração com a secção a soldar

É possível observar na Figura 3.5 que a largura de soldadura proposta entre todos os equipamentos é semelhante denotando-se apenas uma diferença mais acentuada para secções superiores a 16,00 mm².

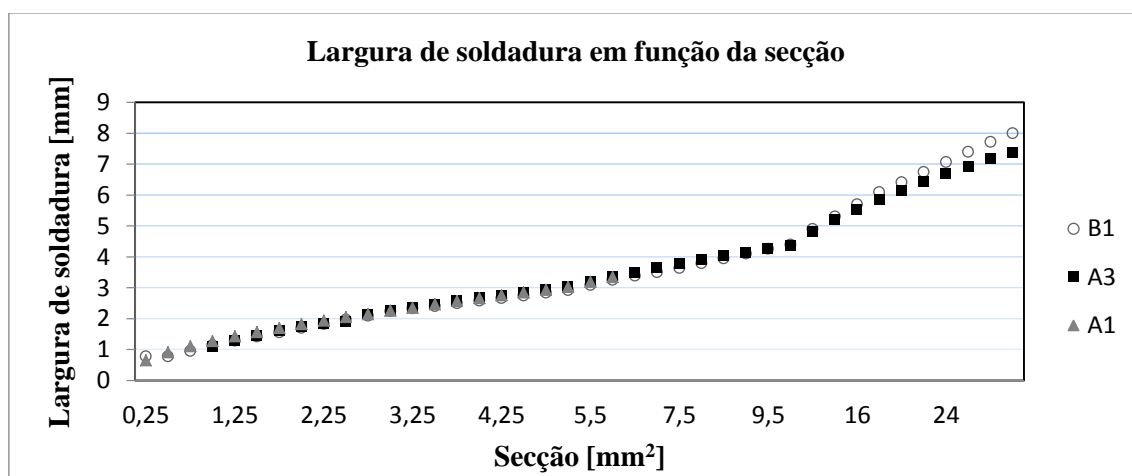


Figura 3.5 – Evolução da largura de soldadura com a secção a soldar

4 EXPERIMENTAÇÃO

Neste capítulo descreve-se a experimentação realizada nomeadamente: a caracterização experimental do material utilizado na soldadura por ultrassons, a análise experimental dos parâmetros debitados pelos equipamentos, a análise de estabilidade ao longo do funcionamento dos equipamentos para realizar a soldadura por ultrassons, análise dimensional dos clips soldados, a qualidade da soldabilidade de cada um dos equipamentos, contabilização dos tempos de manutenção e soldadura e a capacidade de deteção de erros de cada um dos equipamentos.

O equipamento B1 foi avaliado em todos os testes, por permitir processar secções de 0,26 até 26 mm² e não existir qualquer análise do mesmo. O equipamento A1 foi avaliado para secções até 6 mm² pois este foi projetado para secções inferiores a 6 mm². Sempre que possível avaliou-se o equipamento A3 pois este é uma evolução do equipamento A2 permitindo melhores resultados, no entanto apenas se verifica uma diferença significativa entre o equipamento A2 e A3 para secções superiores a 10 mm² devido a refrigeração do equipamento A3.

4.1 TESTES DE CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL UTILIZADO NO FABRICO DE CABLAGENS

Realizaram-se ensaios de tração uniaxial dos vários materiais utilizados para o fabrico das cablagens na indústria automóvel, com o objetivo de avaliar as propriedades mecânicas do cobre e ligas utilizadas na união através do processo de soldadura por ultrassons.

Para efetuar os ensaios estabilidade, performance dos equipamentos, medições e defeitos de soldadura foram realizados diversas soldaduras por ultrassons com diversas configurações. A empresa possui um código para designação do tipo de fio e a configuração dos mesmos, encontrando-se cada letra associada a uma secção de fio, o número apos a letra representa o número de fios desse tipo na soldadura por ultrassons e a letra x divide os lados da soldadura. A Tabela 4.1 contém a nomenclatura ordenada por secção dos fios utilizados para realização dos ensaios.

Tabela 4.1 - Nomenclatura das secções

Secção [mm ²]	Nomenclatura
0,13	<i>CC</i>
0,35	<i>B</i>
0,50	<i>C</i>
0,75	<i>E</i>
1,00	<i>G</i>
1,50	<i>I</i>
2,50	<i>K</i>
3,00	<i>L</i>
4,00	<i>M</i>
5,00	<i>N</i>
6,00	<i>O</i>
7,00	<i>P</i>

4.1.1 Procedimento experimental

Para este estudo foi seleccionado o fio de secção total 0,13 mm² de 7 multifilares com diâmetro de cada multifilar de 0,152 mm, para caracterizar a liga de cobre. Para a caracterização do cobre utilizou-se o fio com a secção de 0,5 mm² de 16 multifilares com diâmetro de cada multifilar de 0,21 mm. Foram escolhidas estas 2 secções pois são as mais utilizadas na produção.

Para a realização destes ensaios cortaram-se 2 amostras de fio de secção 0,13 mm² com 240 mm de comprimento e uma amostra de 0,5 mm² de secção com o mesmo comprimento.

Retirou-se o revestimento de cada uma dessas amostras com auxílio de um alicate de estripar e observou-se cada um dos filamentos de cobre numa lupa, verificando-se que nenhum dos filamentos de cobre a utilizar no ensaio de tração se encontrava indentado pois essa indentação reduziria a resistência mecânica no ensaio de tração.

Para a realização do ensaio de tração uniaxial utilizou-se um equipamento de tração com uma célula de carga de 2 KN.

A distância entre garras foi 100 mm e cada garra tinha uma altura de fixação de 60 mm.

Antes da fixação de cada multifilar foi medido o diâmetro em vários pontos, anotando-se o valor do menor diâmetro, sendo esse o ponto de rotura do multifilar. Na fixação dos multifilares houve o cuidado de garantir que o fio se encontrava alinhado na vertical utilizando

as marcas das garras de fixação, sendo apenas considerados válidos os ensaios em que a rotura dos multifilar ocorreu afastado das garras, garantindo que estas não influenciaram a tensão de rotura do material.

Para o ensaio de tração uniaxial dos multifilares, de acordo com a norma DIN EN 13602 é recomendada a velocidade de tração ou de deslocamento relativo das garras de 50 mm/s no entanto, para estes ensaios foi utilizada a velocidade de 10 mm/s para obtenção de curvas de tração-extensão mais precisas.

O registo da força e a extensão são processados pelo computador, obtendo-se a leitura da força através da célula de carga e a extensão a partir da leitura da posição do travessão.

Estes ensaios tiveram como objetivo caracterizar as propriedades mecânicas dos materiais utilizados na soldadura por ultrassons.

4.2 ANÁLISE EXPERIMENTAL DOS PARÂMETROS DE CADA UM DOS EQUIPAMENTOS

A realização destes ensaios teve como objetivo verificar se os parâmetros que os equipamentos mediam se encontram de acordo com os valores aplicados na soldadura pelos mesmos. Além disso, estes ensaios foram efetuados com o objetivo de verificar se existia a possibilidade de transposição direta de parâmetros de um equipamento para outro. Desta forma, seria facilitada a implementação do novo equipamento pelo facto de permitir a aplicação direta dos valores definidos nas validações já existentes.

4.2.1 Frequência

Para a medição deste parâmetro utilizou-se um medidor de frequência. Este equipamento possuía uma ponta magnética que foi colocada no sonótrodo dos diferentes equipamentos.

4.2.2 Conversão de valor percentual da amplitude em milímetros

Para a medição da amplitude utilizou-se um comparador digital, com um erro de leitura de $\pm 0,001$ mm. Este foi colocado na zona de soldadura perpendicularmente às ondas do sonótrodo e fixo com auxílio da base de fixação magnética com braço ajustável, fixada numa superfície metálica que permanece imóvel durante a soldadura.

Após a fixação realizaram-se as medições de amplitude em mm para as diferentes gamas de amplitude em valor percentual.

4.2.3 Análise da Pressão e medição do consumo ar comprimido

Para medição da pressão fornecida à Bigorna e do consumo de ar durante o processo de soldadura por ultrassons, utilizou-se o equipamento da SMC construído a pedido da empresa com as funções de medição caudal, pressão e fugas de ar, representado na Figura 4.1 Para a medição do consumo de ar foi necessário utilizar válvulas de conversão de 6 mm de diâmetro exterior para 8 mm de diâmetro exterior.



Figura 4.1 - Equipamento para medição da pressão, consumo de ar e fugas no sistema

Para efetuar a medição da pressão de ar aplicada durante o processo de soldadura no equipamento B1, realizou-se a ligação do controlador da “PRESSÃO AVANÇO CILINDRO” como representado na Figura 4.2 e do equipamento SMC “OUT” ao sistema de alimentação da bigorna como representado na Figura 4.3.



Figura 4.2 - Ligação de entrada de ar comprimido do equipamento B1 ao equipamento SMC



Figura 4.3 - Ligação de saída de ar comprimido do equipamento SMC para o equipamento B1

No equipamento A3 ligou-se o tubo de pressão vermelho à tomada de pressão do equipamento construído pela SMC “PRESSÃO AVANÇO CILINDRO” como representado na Figura 4.4 e da saída “OUT” a entrada no equipamento A3 assinalada na Figura 4.5.



Figura 4.4 - Ligação de entrada de ar comprimido do equipamento A3 ao equipamento SMC



Figura 4.5 - Ligação de saída de ar comprimido do equipamento SMC para o equipamento A3

Em ambos os equipamentos efetuaram-se as medições de pressão de 1 bar a 6 bar começando em 1 bar e incrementando a pressão em 1 bar.

Para a medição do caudal consumido pelo equipamento durante a soldadura com o equipamento B1, efetuou-se a ligação do tubo após o medidor de pressão do equipamento. A partir desse ponto, ligou-se ao equipamento da SMC “PRESSÃO AVANÇO CILINDRO”

utilizando uma válvula de conversão de 8 mm de diâmetro exterior para 6 mm, como representado na Figura 4.6. Posteriormente, ligou-se a entrada de distribuição de ar comprimido do equipamento B1 à saída “OUT”, assinalada na Figura 4.7, sendo aqui utilizada uma válvula de conversão de 8 mm de diâmetro exterior para 6 mm.



Figura 4.6 - Ligação de entrada para medição de caudal consumido no equipamento B1



Figura 4.7 - Ligação de saída para medição de caudal consumido no equipamento B1

No equipamento A3, as ligações foram iguais alterando-se apenas a localização das mesmas. A ligação de saída do equipamento A3 para o equipamento da SMC pode ser observada na Figura 4.8 (A). A ligação de entrada no equipamento A3 do equipamento SMC encontra-se assinalada na Figura 4.8 (B).

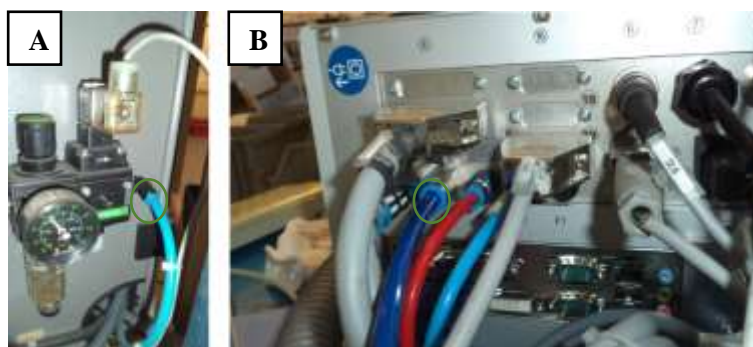


Figura 4.8 - Ligação saída e entrada no equipamento A3

Realizaram-se 10 soldaduras numa secção de $1,5 \text{ mm}^2$ e contabilizou-se o caudal de ar comprimido gasto no final das mesmas. Foi escolhida a secção total de $1,5 \text{ mm}^2$ para evitar que o equipamento B1 ligasse o seu arrefecimento por ar comprimido, evitando assim que a refrigeração tivesse influência no consumo de ar.

Para medição de caudal de arrefecimento por ar comprimido foram realizadas 10 soldaduras numa secção de 8 mm^2 .

4.2.4 Comparação da força aplicada na soldadura

Este ensaio foi realizado com o objetivo de verificar se, aplicando os mesmos parâmetros aos diferentes equipamentos resultavam alturas finais de soldadura semelhantes. Este teste garantiria que a força aplicada à soldadura por os diferentes equipamentos era igual e possibilitaria a utilização dos resultados das validações realizadas no equipamento B1. Selecionou-se uma secção de 6 mm^2 constituída por 2 fios de 3 mm^2 com 44 multifilares e cujo diâmetro era de 0,31 mm.

4.3 ANÁLISE DE ESTABILIDADE

Para a análise de estabilidade foi analisado a altura final de cada soldadura.

A altura inicial e o tempo de soldadura identificam eventuais erros de operação como o incorreto posicionamento dos fios e a detenção de multifilares que podem ter sido cortados durante o processo de remoção do revestimento e a contaminação do fio. Este são parâmetros importantes para verificar se a soldura foi efetuada corretamente, no entanto não avaliam a estabilidade do processo.

Foi analisada a estabilidade de cada um dos equipamentos do fornecedor A comparando esta com o equipamento do fornecedor B, em todos os ensaios realizados fora utilizados os parâmetros *standard* de cada um dos equipamentos pois, o que se pretendia avaliar era a estabilidade de cada um dos equipamentos e, se ao longo da produção estes adquiriam a tendência de aumentar ou reduzir a altura final da soldadura.

Para efetuar a comparação de estabilidade do equipamento B1 com o equipamento A1 foram selecionadas as configurações representadas na Tabela 4.2, possuindo esta tabela também informação do fio de fio utilizado.

Para cada uma destas configurações realizaram-se 50 soldadura com uma cadência semelhante a fabril de 3 soldadura por minuto. Não se realizando ensaios de estabilidade para

configurações superiores a 6 mm² pois esta é a secção máxima que o equipamento A1 consegue processar.

Tabela 4.2 - Secções utilizadas para comparação de estabilidade entre o equipamento B1 e A1

Configuração	CC2xCC	B3	C3	C2xC3	E4	G4	E2xG3	G3xI2
Secção total [mm ²]	0,39	1,05	1,50	2,50	3,00	4,00	4,50	6,00
Diâmetro dos multifilares [mm]	0,152	0,26	0,21	0,21	0,21	0,21	0,26	0,21/ 0,26
Número de multifilares	7	7	16	16	24	32	50	32/30

Para efetuar a comparação de estabilidade do equipamento B1 com o equipamento A2 foram selecionadas as configurações representadas na Tabela 4.3 possuindo esta tabela também informação do fio de fio utilizado.

Para cada uma destas configurações realizaram-se 50 soldadura com uma cadência semelhante a fabril de 3 soldadura por minuto. Não se efetuaram ensaio para secções superiores a 10 mm² pois o equipamento A2 não possui nenhum mecanismo de arrefecimento.

Tabela 4.3 - secções, material e cadência utilizada no estudo de estabilidade (B1 vs A2)

Configuração	B3	C3	C2xC3	E4	G4	K2	G3xI2	N2
Secção total [mm ²]	1,05	1,50	2,50	3,00	4,00	5,00	6,00	10,00
Diâmetro dos multifilares [mm]	0,26	0,21	0,21	0,21	0,21	0,26	0,21/ 0,26	0,33
Número de multifilares	7	16	16	24	32	50	32/30	65

Na comparação dos equipamentos B1 e A3 foi avaliada a influência da temperatura na estabilidade do processo para efetuar este estudo escolheu-se a secção de 12 mm² constituída por 3 fios de 4 mm² com 56 multifilares e cujo diâmetro era de 0,31 mm.

Realizaram-se 200 soldadura com uma cadência de 2 e 3 vezes a produção fabril sendo estas 6 e 9 soldadura por minuto. Com a produção de 9 soldaduras por minuto simula-se limite em que não existe o arrefecimento completo do *tooling* antes de efetuar uma nova soldadura.

Após a realização de cada um destes ensaios, os dados foram tratados e construídas as curvas de estabilidade e a curva de tendência de cada configuração

Os testes tiveram maior ênfase em secções inferiores a 6 mm^2 pois 80% das soldaduras realizadas para a indústria da cablagem automóvel encontram-se a baixo desse valor.

4.4 VERIFICAÇÕES DA PRECISÃO DE LEITURA DOS EQUIPAMENTOS

Para a verificação da precisão de leitura dos equipamentos foram selecionadas 3 secções nomeadamente uma secção de $0,70 \text{ mm}^2$, uma secção de $5,00 \text{ mm}^2$ e uma secção de $12,00 \text{ mm}^2$, devidamente representadas na Tabela 4.4, foram utilizados os parâmetros *standard* de cada um dos equipamentos para efetuar a soldadura.

Tabela 4.4 - Secções utilizadas para verificações das medições dos clips

Configuração	B2	K2	O2
Secção total [mm^2]	0,70	5,00	12,00
Diâmetro dos multifilares [mm]	0,25	0,26	0,31
Nº de multifilares	7	50	84

Neste ensaio foi utilizado fio com 200 mm de comprimento total e 15 mm de comprimento estripado. Antes do início de cada ensaio retirou-se o revestimento que se encontrava nas pontas estripadas e verificou-se se não existiam multifilares cortados ou indentados. Após essas verificações realizaram-se 100 soldaduras de cada secção e anotou-se o valor de largura e altura medidos por cada equipamento na primeira soldadura, na décima e de 10 em 10 até perfazer as 100 soldaduras. Estas soldaduras foram identificadas com o seu respetivo número e medidas após o ensaio com auxílio do micrómetro Mitutoyo de faces de pontas planas assumindo-se um erro de medição de 0,001 mm.

4.5 PERFORMANCE DOS EQUIPAMENTOS

Foi avaliada a performance de cada um dos equipamentos utilizando os parâmetros *standard*, submetendo as diversas soldaduras realizadas em cada um dos equipamentos a ensaios destrutivos de fadiga, de dobragem bem como, a ensaios de *pull* e *peel*. A qualidade da soldadura nos ensaios de *pull* e *peel* foi avaliada através da equação 2.3.

Para a realização dos ensaios destrutivos de dobragem e corte utilizou-se o Dinamómetro eletrónico Mar Prüftechnik GMBH do fornecedor MAV representado na Figura 4.9 este possuía uma célula de carga de 2000 N. A velocidade dos ensaios foi mantida a 50 mm/min, de acordo com a norma DIN aplicada. Este equipamento procede ao registo o valor de força máxima necessária para destruição dos clips soldados pelo processo de ultrassons.



Figura 4.9 - Dinamómetro eletrónico Mav Prüftechnik GMBH do fornecedor MAV

4.5.1 Ensaios de Fadiga

Os ensaios de fadiga simulam as condições passagem da zona unida por soldadura por ultrassons ao longo das curvas e contracurvas do painel de montagem da cablagem. Além disso, simulam também o enrolamento e desenrolamento que as cablagens sofrem após todas as soldaduras estarem concluídas e os esforços de dobragem e desdobragem presentes durante a montagem da cablagem no veículo automóvel.

Foram escolhidas configurações de fio de $0,13 \text{ mm}^2$ constituídas por 3 fios por ser o número mínimo de fios utilizado nas soldadura e por o material constituinte deste fio ser a liga de cobre que possui uma menor elasticidade que o cobre puro.

Neste teste foi utilizado fio de $0,13 \text{ mm}^2$ com 7 multifilares sendo que, cada multifilar possuía um diâmetro médio de 0.154 mm e, cada um dos cabos utilizados neste teste possuía 600 mm de comprimento total, com 15 mm de estripado em ambos os lados. Os testes realizaram-se nos equipamentos B1 e no equipamento A1, não tendo sido realizados os testes nos equipamentos A2 e A3 devido ao facto desta não permitir processar secções de fio inferiores a $0,35 \text{ mm}^2$.

Efetuararam-se 30 soldaduras com a configuração de CC2xCC, separadas em 3 grupos de 10 clips. Foi deixado um dos grupos sem qualquer reforço na zona de soldadura, no segundo grupo de 10 protegeu-se a zona de soldadura com fita-cola do tipo Gafa e, no terceiro grupo de 10 clips foi protegida a zona de soldadura com uma manga retráctil com cola. É possível observar um exemplo de cada um dos reforços da zona de soldadura na Figura 4.10, devidamente assinalados: (A) Clip sem nenhum reforço, (B) Clip reforçado com fita-cola do tipo Gafa e (C) Clip reforçado com manga retráctil com cola.



Figura 4.10 - Clips utilizados nos ensaios de fadiga com a configuração CC2xCC com os diferentes reforços da zona de soldadura.

Realizou-se 10 soldaduras com a configuração de CC3, cuja zona de soldadura foi protegida com fita-cola do tipo Gafa e o cabo que se encontrava na parte superior da soldadura foi dobrado para o lado oposto e preso com 3 voltas de fita-cola de tecido como representado na Figura 4.11.



Figura 4.11 - Clip de ensaios de fadiga com a configuração CC3

Os testes foram realizados recorrendo a um conjunto de 3 rolos de 18 mm de diâmetro e distanciados entre si 45 mm, nos quais a soldadura a ensaiar é colocada de modo a fazer um caminho em zig-zag entre os rolos como representado na Figura 4.12



Figura 4.12 - Conjunto de rolos utilizados nos ensaios de fadiga e colocação do fio

Uma das pontas do fio é fixa a uma garra que se encontra numa corrediça ligada ao motor elétrico que vai fornecer o movimento a um mecanismo do tipo biela manivela que origina o movimento na horizontal para a frente e para trás da corrediça. Na Figura 4.13 encontra-se assinalado com o número: (1) Garra de fixação, (2) Corrediça, (3) Motor elétrico e (4) Mecanismo biela-manivela.

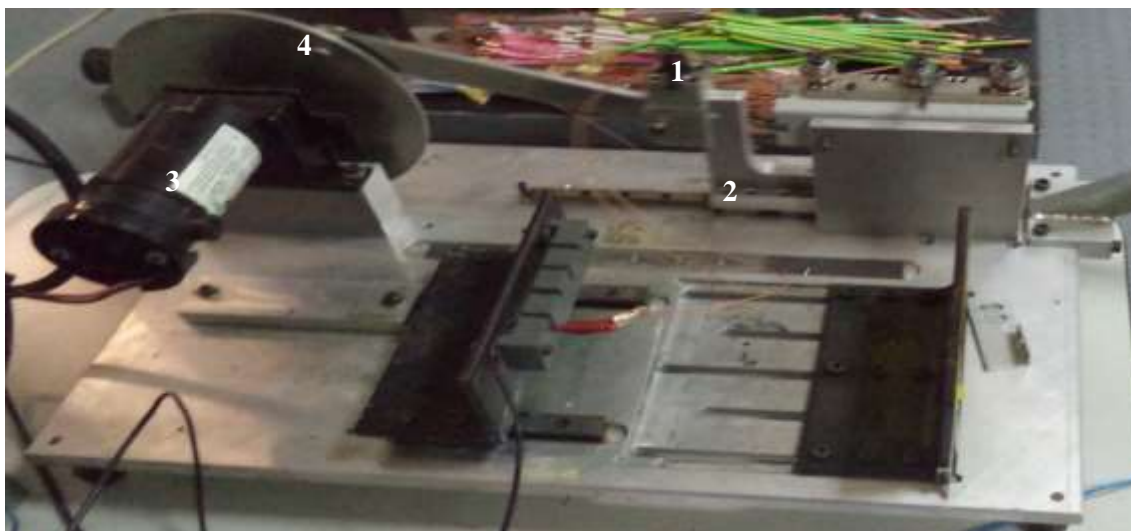


Figura 4.13 - Equipamento ensaio de fadiga, garra de fixação, corredeira e motor

Na outra extremidade do fio é fixada numa garra ligada por uma roldana a um peso de 2 Kg como representado na Figura 4.14, onde se encontra representado com o número: 1- garra de fixação e 2- peso de 2 Kg.



Figura 4.14 - Equipamento ensaio de fadiga, segunda garra de fixação e peso

Para a realização deste ensaio utilizou-se a soldadura como ponto de passagem de energia entre o motor e a fonte de alimentação, parando o motor no momento da rotura da ligação.

Os ensaios realizaram-se com a fonte de alimentação a debitar 24 V e 5 amperes, sendo o número de ciclos contabilizado por um contador implementado no disco do motor.

4.5.2 Ensaios de dobragem

Os ensaios de dobragem servem para simular as condições a que um clip está sujeito durante a montagem no painel. Este ensaio justifica-se pelo facto do clipe por vezes, encontrar-se junto a um pino no painel de montagem que irá sofrer esforços de dobragem quando a cablagem for tracionada para passar pelos outros pinos.

Foram testadas configurações de fio com fio de $0,13 \text{ mm}^2$ pois são estas as secções que nas soldaduras apresentam uma altura final menor, apresentando por isso piores resultados nos ensaios de dobragem da soldadura.

Estes testes apenas foram realizados no equipamento B1 e A1 pois os equipamentos A2 e A3 só permitem processar secções superiores a $0,70 \text{ mm}^2$.

Nestes testes efetuaram-se 15 soldaduras com uma cadência de produção de 3 soldadura por minuto de cada uma das configurações representadas na Tabela 4.5. Foram escolhidas estas secções e configurações por permitirem analisar a influência, nos ensaios de dobragem da utilização da liga de cobre apenas, e a influência de quando existe a mistura da liga de cobre com cobre. Em todos estes ensaios foram utilizados os parâmetros *standard* de cada um dos equipamentos

Tabela 4.5 - Secções e configurações utilizadas nos ensaios de dobragem da soldadura

Configuração	CCx	Bx	CC2x	Bx	Cx	CC3x	BCCx
	CC2	CC	CC2	CC2	CC	CC2	CC2
Secção total [mm ²]	0,39	0,48	0,52	0,61	0,63	0,65	0,74
Diâmetro dos multifilares [mm]	0,152	0,26/ 0,152	0,152	0,26/ 0,152	0,21/0,152	0,152	0,26/ 0,152
Número de multifilares	7	7	7	7	16/7	7	7

Os ensaios a estas soldaduras realizaram-se com o Dinamómetro eletrónico Mar Prüftechnik GMBH, utilizando-se as garras do mesmo como pontos de apoio do clip. Para o equipamento A1 foi usada a abertura entre garras de 3 mm e, para o equipamento B1 foi utilizada a abertura de 6 mm, ajustadas com auxílio de uma craveira.

Foi utilizada a distância de 3 e 6 mm por ser a distância máxima de afastamento das garras que permitirem a dobragem sem escorregamento do clips dos diferentes equipamentos.

É importante frisar que os clips resultantes da soldadura do equipamento A1 possuem 9 mm de comprimento soldado, e os clips resultantes da soldadura no equipamento B1 possuem 12 mm de comprimento. Apesar de este não ser um teste justo, pelo facto do clip do equipamento B1 encontrar-se sujeito a um momento de dobragem superior, são estas as condições que terão de suportar durante a montagem no painel.

No momento seguinte, efetuou-se a ligação de um cabo com uma amarra na extremidade à parte móvel do dinamómetro, sendo essa amarra que vai efetuar a força de dobragem no centro da soldadura. Realizaram-se 15 ensaios a cada uma das configurações utilizando-se 50mm/s como velocidade de avanço do dinamómetro. Considerando apenas como valores corretos os valores em que a dobragem ocorreu no centro do clip, é possível observar na Figura 4.15 o ensaio de dobragem e soldadura, encontrando-se assinalado com a letra: (A) condições de início do ensaio, (B) condições de fim do ensaio e (C) dobragem correta do clip.

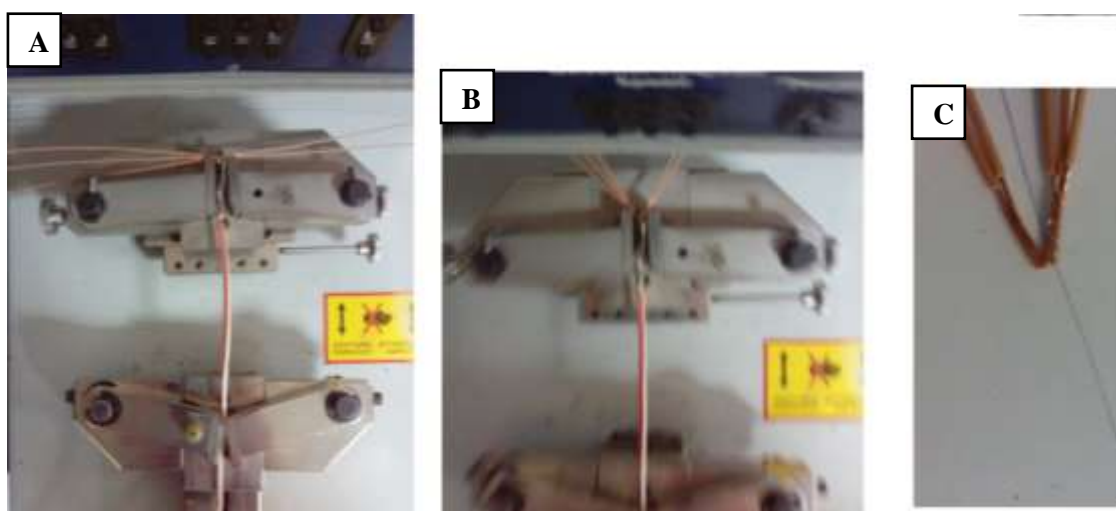


Figura 4.15 - Ensaio de dobragem CC2xCC3

4.5.3 Ensaio de *pull* e *peel*

Os ensaios de *pull* e *peel* simulam os esforços a que as soldaduras se encontram sujeitas durante a montagem da cablagem no veículo automóvel. Quando um dos terminais na montagem da cablagem não chega ao local de ligação do mesmo, o operador puxa o cabo para combater o enrolamento ou alguma dobra que este possua. No entanto, se a soldadura não se encontrar acima de um valor mínimo e, com os sucessivos puxões do operador, a ligação soldada será quebrada.

Para simular os esforços que as cablagens estarão sujeitas utilizam-se um, de dois testes. Realiza-se o teste de *peel*, quando todos os fios se encontram de um lado da soldadura

tracionando o fio superior com a menor secção, que constitui o mais fraco na soldadura por ser aquele que recebeu menos energia. Os testes de *pull* utilizam-se quando os clips possuem geometria cruzada sendo tracionado o fio de menor secção. Estes tipos de ensaios encontram-se representados na Figura 4.16.



Figura 4.16 - Ensaios de peel e pull respetivamente

Estes ensaios realizaram-se nos equipamentos: B1, A1 e A2. O foco foram as secções inferiores a 6 mm^2 uma vez que, 80% das validações realizadas para produção encontram-se abaixo dessa secção, e o equipamento A1 encontra-se limitado a secções inferiores a 6 mm^2 .

Os ensaios de *peel* e *pull* realizaram-se às configurações representadas na Tabela 4.6 e Tabela 4.7, respetivamente, não tendo sido realizadas as configurações CC5 e CC3xCC2 pois o equipamento A2 não consegue processar fios de secção inferior a $0,35 \text{ mm}^2$. Todos os ensaios foram realizados utilizando os parâmetros *standard* dos equipamentos, realizando 50 soldaduras de cada configuração com uma cadência de 3 soldaduras por minuto.

Tabela 4.6 - Configurações ensaios de peel

Configuração	CC5	B3	C3	E4	G4
Secção total [mm^2]	0,65	1,05	1,5	3,0	4,0
Diâmetro dos multifilares [mm]	0,152	0,26	0,21	0,21	0,21
Número de multifilares	7	7	16	24	32

Tabela 4.7- Configurações ensaios de pull

Configuração	CC3xCC2	B2xC3	C2xC3	E2xG3	G3xI2
Secção total [mm^2]	0,65	2,2	2,5	4,5	6,0
Diâmetro dos multifilares [mm]	0,152	0,26/ 0,21	0,21	0,21	0,21/ 0,26
Número de multifilares	7	7/16	16	24/32	32/30

4.5.4 Otimização da configuração C3

Realizou-se este teste com o intuito de verificar se, após otimização de parâmetros do equipamento B1, este obteria melhores valores de C_{pk} que o equipamento A3.

A otimização foi realizada para configurações em que todos os fios se encontram de um dos lados da soldadura, sendo estas as configurações ensaiadas em *peel*. Relativamente aos valores de força nos ensaios destrutivos, estes são inferiores aos dos ensaios de *pull* e muito mais instáveis. Desta forma, é possível otimizar os valores para os ensaios de *peel* garantindo que a mesma secção constituída pelos mesmos fios, mas com uma geometria cruzada, obterá bons valores para os ensaios de *pull*.

Foi escolhida a secção $1,50 \text{ mm}^2$ por se tratar de uma secção de dimensão reduzida, sendo por isso mais complicada de otimizar e, por ser constituída por 3 fios de $0,50 \text{ mm}^2$ com 16 multifilares, o fio mais utilizados nas validações para a produção.

Estes ensaios ocorreram após a medição dos parâmetros dos equipamentos sabendo que, antes de realizar a otimização o único parâmetro diferente na soldadura seria a força na zona de soldadura, foram utilizados os parâmetros de validação da secção C3 com exceção da pressão.

Iniciado o teste com a pressão de defeito do equipamento a 2,6 Bar, realizaram-se 10 solduras e efetuou-se um cálculo do C_{pk} . Posteriormente, efetuaram-se mais 10 solduras acrescentando 0,2 Bar à pressão inicial, terminando com mais 10 solduras às quais se retirou 0,2 Bar. Verificou-se assim, qual destes 3 grupos de soldaduras apresentava um valor de C_{pk} superior, ao qual foi retirado mais 0,2 bar. O teste de otimização terminou quando, à medida que a pressão ia sendo retirada, existia uma redução do valor de C_{pk} .

4.6 DEFEITOS DE SOLDADURA

No processo de soldura por ultrassons existem 3 defeitos típicos: a oxidação do cobre , *loop* e corte de multifilares.

Tipicamente, a oxidação do cobre ocorre em secções de maior dimensão, caracterizadas por necessitarem de uma energia mais elevada, gerando assim uma maior quantidade de calor que por, não ser instantaneamente dissipado, faz com que a energia necessária para efetuar a soldadura seja menor que a inicial. Quando a energia é muito superior à necessária origina essa oxidação do cobre e uma extrusão do material originando assim uma redução da força necessária para separar os multifilares.

O *loop* ocorre normalmente por um excesso de amplitude dos parâmetros definidos, considerado um defeito pois durante a montagem da cablagem completa esse filamento quebra-

se originando uma ponta afiada, que pode ferir o operador ou danificar a manga de proteção do clip.

O corte de multifilares normalmente ocorre devido ao excesso de pressão fornecida pela bigorna ou por um ajuste indevido das folgas entre as peças que efetuam o movimento durante a soldadura.

Cada um destes defeitos encontra-se representado na Figura 4.17 com a letra: (A) Oxidação do Cobre, (B) Loop de multifilares e (C) corte de multifilares.



Figura 4.17 - Defeitos de Soldadura numa secção de 12 mm²

Para analisar os defeitos de soldadura durante a produção foram escolhidas 3 secções: uma secção de 0,70 mm² com a configuração B2, uma secção de 5,00 mm² com a configuração de K2 e uma secção de 12,00 mm² com a configuração O2. Foram realizadas 100 soldaduras por ultrassons com os parâmetros *standard* de cada um dos equipamentos, para as diferentes configurações. Sendo estas realizadas com uma cadência semelhante a fabril de 3 soldaduras por minuto. Na Tabela 4.8 encontra-se as configurações de fio e o tipo de fio utilizado nos ensaios.

Tabela 4.8 - Configurações utilizadas para análise dos defeitos de soldadura

Configuração	B2	K2	O2
Secção total [mm ²]	0,70	5,00	12,00
Diâmetro dos multifilares [mm]	0,26	0,26	0,31
Número de multifilares	7	50	84

Para contabilizar os defeitos de soldura, por aquecimento do *tooling* justificada pela soldadura ser de grandes dimensões e ser efetuada com uma cadência elevada, foi utilizada a configuração M3. As soldaduras foram efetuadas 200 soldadura com parâmetros *standard* do equipamento, com uma cadência de 6 e 9 por minuto, sendo utilizado nestes ensaios 3 fios de 4,00 mm² com 56 multifilares de diâmetro 0,31 mm.

Foi também realizado um teste em sequência com duas configurações de soldaduras, uma de grandes dimensões P3 (21 mm²) e uma de pequenas dimensões G (1 mm²) com o

objetivo de avaliar a capacidade ajuste dos equipamentos. A sequência utilizada e o número de soldaduras efetuadas encontram-se representados na Tabela 4.9, sendo utilizados neste teste os parâmetros *standard* de cada um dos equipamentos.

Tabela 4.9 - Sequência utilizada para análise dos defeitos de soldadura

Configuração	P3	G	P3	G	P3	G
Secção total [mm ²]	21,00	1,00	21,00	1,00	21,00	1,00
Diâmetro dos multifilares [mm]	0,33	0,21	0,33	0,21	0,33	0,21
Número de multifilares	84	32	84	32	84	32
Número de soldaduras	10	10	20	20	50	50
Cadência [soldaduras/min,]	3	3	3	3	3	3

4.7 TEMPOS DE ARRANQUE DO REPOUSO E MANUTENÇÃO DOS DIFERENTES EQUIPAMENTOS

Para a contabilização e tempos foram efetuadas duas análises: análise ao tempo necessário para a manutenção de cada um dos equipamentos e análise ao tempo que cada um dos equipamentos requer para ficar operacional, encontrando-se os mesmos desligados no início da contabilização.

Para a análise de manutenção de cada um dos equipamentos foi contabilizado o tempo que um técnico, de cada um dos fornecedores, demorava a efetuar a manutenção a cada equipamento. Este teste foi realizado desta forma pois ambos os técnicos encontravam-se familiarizados com os equipamentos, procedendo-se à manutenção destes em condições semelhantes.

Foram efetuadas 3 medições do tempo necessário para que cada equipamento ficasse operacional, com o objetivo de avaliar qual dos equipamentos ficava operacional mais rapidamente.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 RESULTADOS DOS TESTES DE CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

Os dois materiais utilizados no fabrico de cablagens para indústria automóvel apresentam um comportamento distinto. A liga de cobre, cujo ensaio de tração se encontra representado na Figura 5.1, apresenta um alongamento máximo de 1,4%, enquanto o cobre cujo ensaio de tração se encontra representado na Figura 5.2, apresenta um alongamento mínimo de 20,2% sendo este muito superior ao máximo da liga de cobre. É possível analisar que, apesar dos filamentos da liga de cobre utilizados possuírem um diâmetro inferior aos filamentos de cobre, este suportam mais do dobro da força do que o cobre.

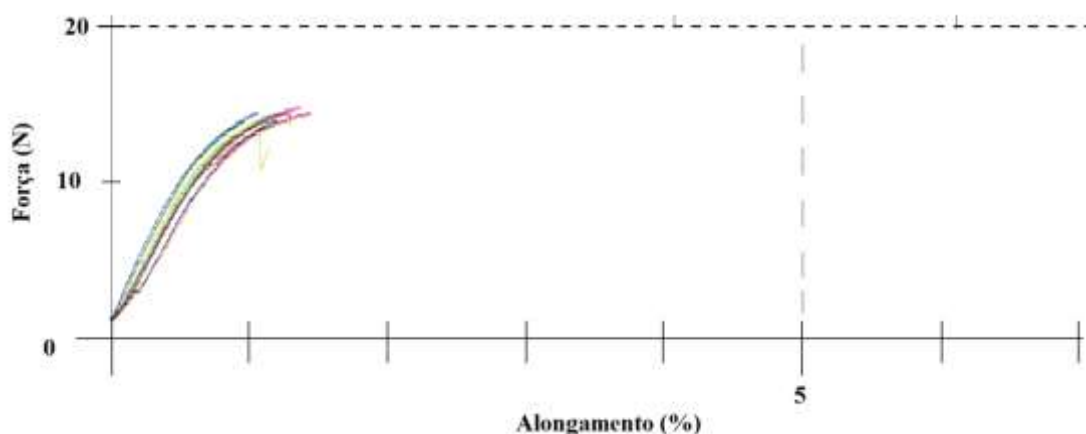


Figura 5.1 - Resultados dos ensaios de tração dos multifilares da liga de cobre

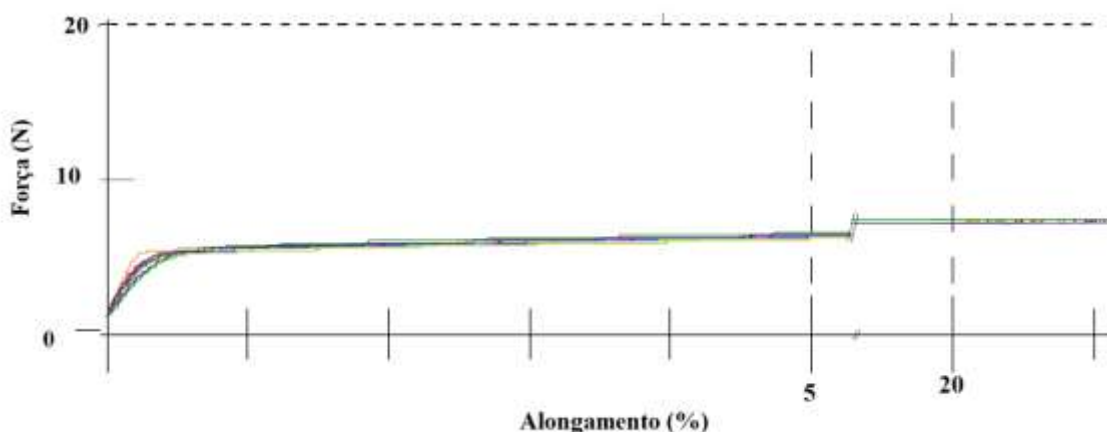


Figura 5.2 - Resultados dos ensaios de tração dos multifilares de cobre

Utilizando os dados dos ensaios de tração e aplicando a eq. 5.1. É possível verificar que o valor da tensão de rotura para a liga de cobre é de cerca de 873 MPa e para o cobre é aproximadamente de 265 MPa.

$$\sigma_{rot} = \frac{Força_{rot.}}{Area} \quad (5.1)$$

5.2 RESULTADOS DA ANÁLISE EXPERIMENTAL DOS PARÂMETROS DE CADA UM DOS EQUIPAMENTOS

Frequência

Apos a realização de todos os ensaios verificou-se que: o equipamento B1 tinha um valor médio de frequência de 20,06 KHz, o equipamento A1 tinha um valor médio de frequência de 20,04 KHz, o equipamento A2 tinha um valor médio de frequência de 20,14 KHz e o equipamento A3 tinha um valor médio de frequência de 19,97 KHz. Estes valores encontram-se todos dentro da tolerância admissível de 1,5% da frequência de 20KHz.

Conversão de amplitude

Utilizando os valores médios das medições de amplitude nos diferentes equipamentos, construiu-se o gráfico representado na Figura 5.3, que permite comparar as amplitudes de vibração efetiva na soldadura (em mm), com as impostas em cada um dos equipamentos estas são um valor em percentagem de um valor máximo. Observa-se que os 3 equipamentos têm uma evolução aproximadamente igual e os desvios para amplitudes mais elevadas se encontram dentro da especificação.

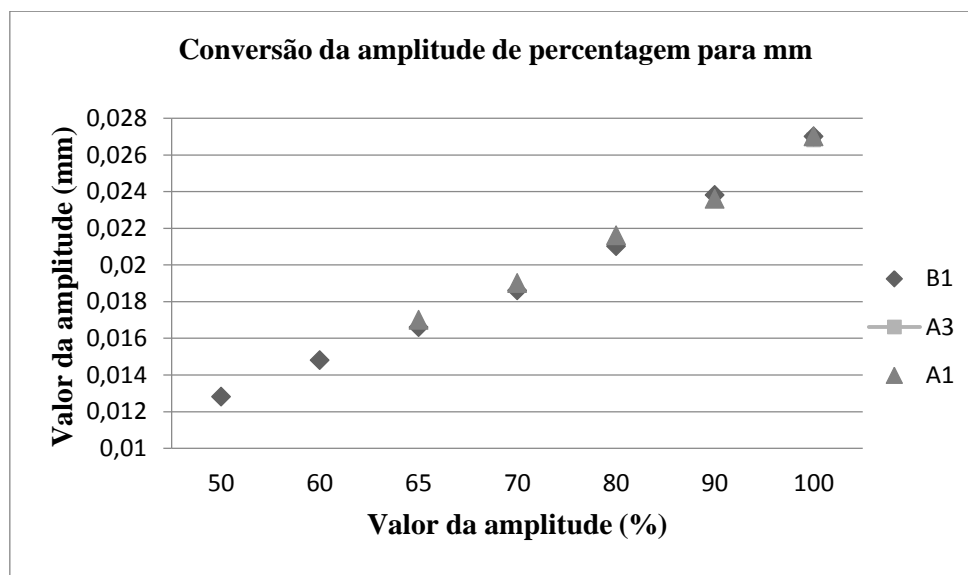


Figura 5.3 - Gráfico da amplitude de vibração

Medições de pressão

Os valores obtidos nos testes de medição de pressão encontram-se representados na Tabela 5.1 , na qual é possível observar que o equipamento A3 mostrou ser mais preciso que o equipamento B1 para pressões até 4 Bar, enquanto para valores superiores a 4 Bar o resultado sofreu uma inversão, mostrando o equipamento B1 como sendo mais preciso.

Tabela 5.1 - Medições de pressão		
Pressão [Bar]		
Pressão definida pelos parâmetros	B1	A3
1,00	1,06	1,02
2,00	2,08	2,00
3,00	3,08	3,01
4,00	4,05	4,01
5,00	5,01	5,06
6,00	6,14	6,26

Análise do consumo de ar comprimido

Foi constatado que, no final das 10 soldaduras para uma secção de 1,5 mm², o equipamento B1 tinha consumido 12 l de ar comprimido, enquanto o equipamento A3 apresentou um consumo de 7l. Este teste prova que o consumo de ar comprimido por soldadura é muito superior no equipamento B1, consumindo este último 1,2 l por soldadura, enquanto no A3 é de apenas 0,7 l por soldadura.

Dados de produção indicam que por turno se realizam 1000 soldadura pelo processo de soldadura por ultrassons, e que o custo de ar comprimido é 0,002 cêntimos por litro. Utilizando a eq. 5.2 Verifica-se que o equipamento B1 representa um aumento de custo 1 cêntimo por equipamento e por turno.

$$Custo_{turno} = \Delta_{consumo} \times n_{soldaduras} \times custo_{ar} \quad (5.2)$$

Sabendo que as fabricas em média trabalham 2 turnos por dia e que o ano de 2015 possui 255 dias uteis. Utilizando a eq. 5.3 estima-se que o custo de implementação anual por cada equipamento B1 será aproximadamente 5,1€ .

$$Custo_{anual} = Custo_{turno} \times n_{turnos} \times n_{ano} \quad (5.3)$$

Após a realização das 10 soldaduras numa secção intermédia de 8 mm², verificou-se que o equipamento B1 tinha consumido 9 L por soldadura, subtraindo a esse valor o consumo de ar comprimido necessário para efetuar a soldadura. Para a refrigeração de uma secção de 8 mm², o equipamento B1 utiliza 7,8 L.

Utilizando a eq. 5.4 e mantendo o mesmo numero de soldadura diárias e custo de ar comprimido obteve-se um custo de 15,6 cêntimos por turno para a refrigeração do equipamento.

$$Custo_{ref.Turno} = Consumo_{ref.} \times n_{soldaduras} \times custo_{ar} \quad (5.4)$$

Utilizando a eq. 5.5, mantendo mesmo número de turnos e o mesmo número de dias uteis estima-se que o equipamento B1 tem um encargo anual para refrigeração por equipamento de 79,5€ por equipamento.

$$Custo_{ref.anual} = Custo_{ref.Turno} \times n_{turnos} \times n_{ano} \quad (5.5)$$

Somando o aumento de valor de custo anual para realização da soldadura, com o valor de custo anual de refrigeração do equipamento por ar comprimido, a aquisição do equipamento B1 resulta num encargo suplementar de 84,5 € por equipamento.

Comparação de força aplicada na soldadura

Utilizando os mesmos parâmetros em ambos os equipamentos para a secção de 6 mm², a altura final média após a soldadura para o equipamento A2 do clip foi de 2,09 mm, e para o equipamento B1 foi de 2,30 mm. Assim, para a mesma pressão, o equipamento A2 aplica mais força na zona de soldadura apesar da área de contacto entre os multifilares e a bigorna ser igual. A razão para esta diferença deve-se, possivelmente, pelo facto dos cilindros possuírem uma dimensão diferente e o facto do equipamento A2 possuir um mecanismo de alavanca que aumenta a força aplicada na zona de soldadura.

Para utilizar diretamente os valores das validações seria necessária uma célula de carga e efetuar várias medições da força na zona de soldadura com vista à criação de uma tabela de equivalência de pressões entre os equipamentos, o que não foi possível por falta da célula de carga.

5.3 RESULTADOS DOS TESTES DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE

Análise de estabilidade para o equipamento B1 e A1

Após o tratamento dos dados estatísticos construíram-se os gráficos de estabilidade de valores da altura final encontram-se representados na Figura 5.4, correspondendo o eixo vertical ao valor percentual e o eixo horizontal ao valor da altura final apos a soldadura. Nessa figura encontram-se representadas as curvas de estabilidade do equipamento B1 (preto) e do equipamento A1 (verde).

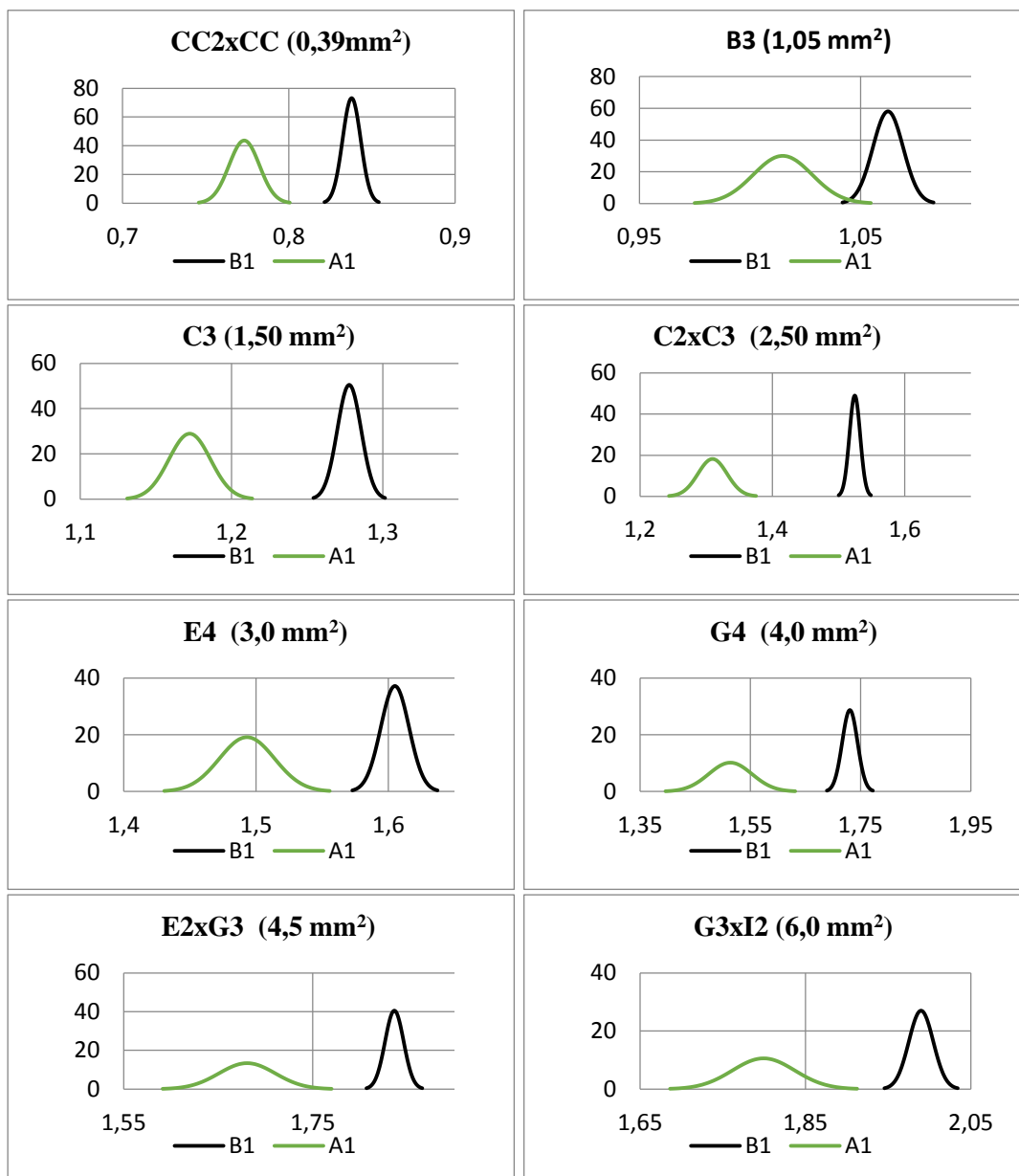


Figura 5.4 - Gráficos resultantes dos ensaios de estabilidade entre o equipamento B1 e A1

Da análise dessas curvas verifica-se que o equipamento B1 efetua uma compactação inferior a do equipamento A1 e que o aumento da secção gera uma instabilidade maior. Esta instabilidade é devida ao aumento do número de multifilares presentes na soldadura que possibilita um maior número de rearranjos dos multifilares após a soldadura. No entanto o equipamento B1 apresentou uma maior estabilidade para todas as configurações testadas.

Para estudar a tendência ao longo dos ensaios construíram-se os gráficos representados na Figura 5.5 para as diferentes configurações partindo dos valores de altura final medida nos equipamentos A1 e B1.

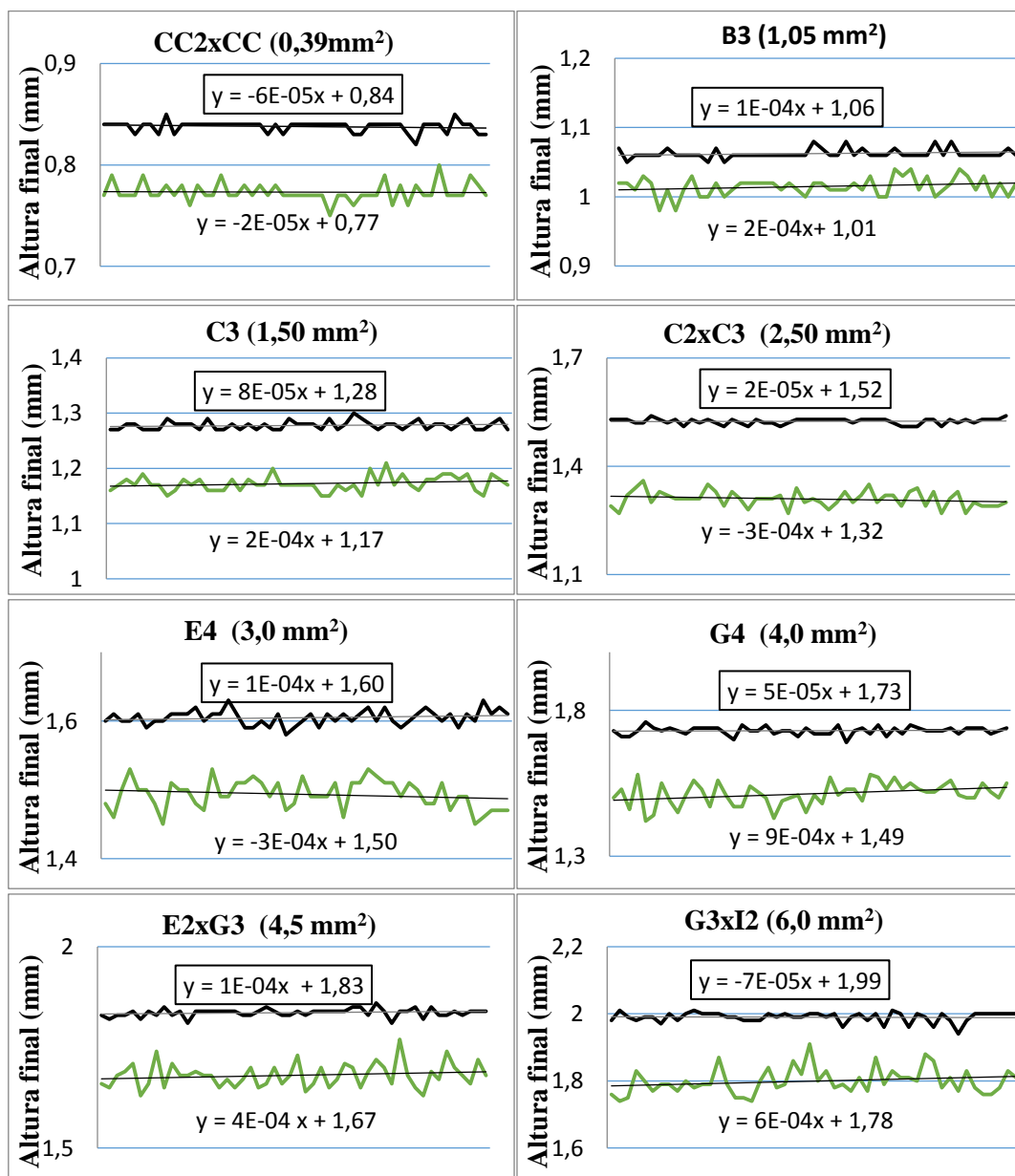


Figura 5.5 - Gráficos de tendência dos ensaios de estabilidade para os equipamentos B1 e A1

Nestes gráficos é possível verificar que o equipamento A1 apenas obteve melhores de tendência para a configuração CC2xCC tendo sido este equipamento projetado para secções pequenas. No entanto o equipamento B1 apresentou uma tendência melhor para todas as outras configurações.

Análise de estabilidade para os equipamentos B1 e A2

Utilizando os dados estatísticos da altura final da soldadura dos vários equipamentos para as diferentes configurações construiu-se os gráficos de estabilidade para efetuar a comparação entre o equipamento B1 e o equipamento A2. Estes gráficos encontram-se representados na Figura 5.6, estando representado a curva de estabilidade do equipamento B1(preto) e a curva de estabilidade do equipamento A2(amarelo).

É possível verificar através da análise destes gráficos, que o equipamento B1 apresenta uma estabilidade dos valores da altura final após a soldadura 2 vezes superior para as diferentes configurações analisadas.

Ate a secção de $1,5 \text{ mm}^2$ o equipamento A2 apresenta uma maior compactação após essa secção o equipamento B1 efetua uma compactação superior para as diferentes secções analisadas.

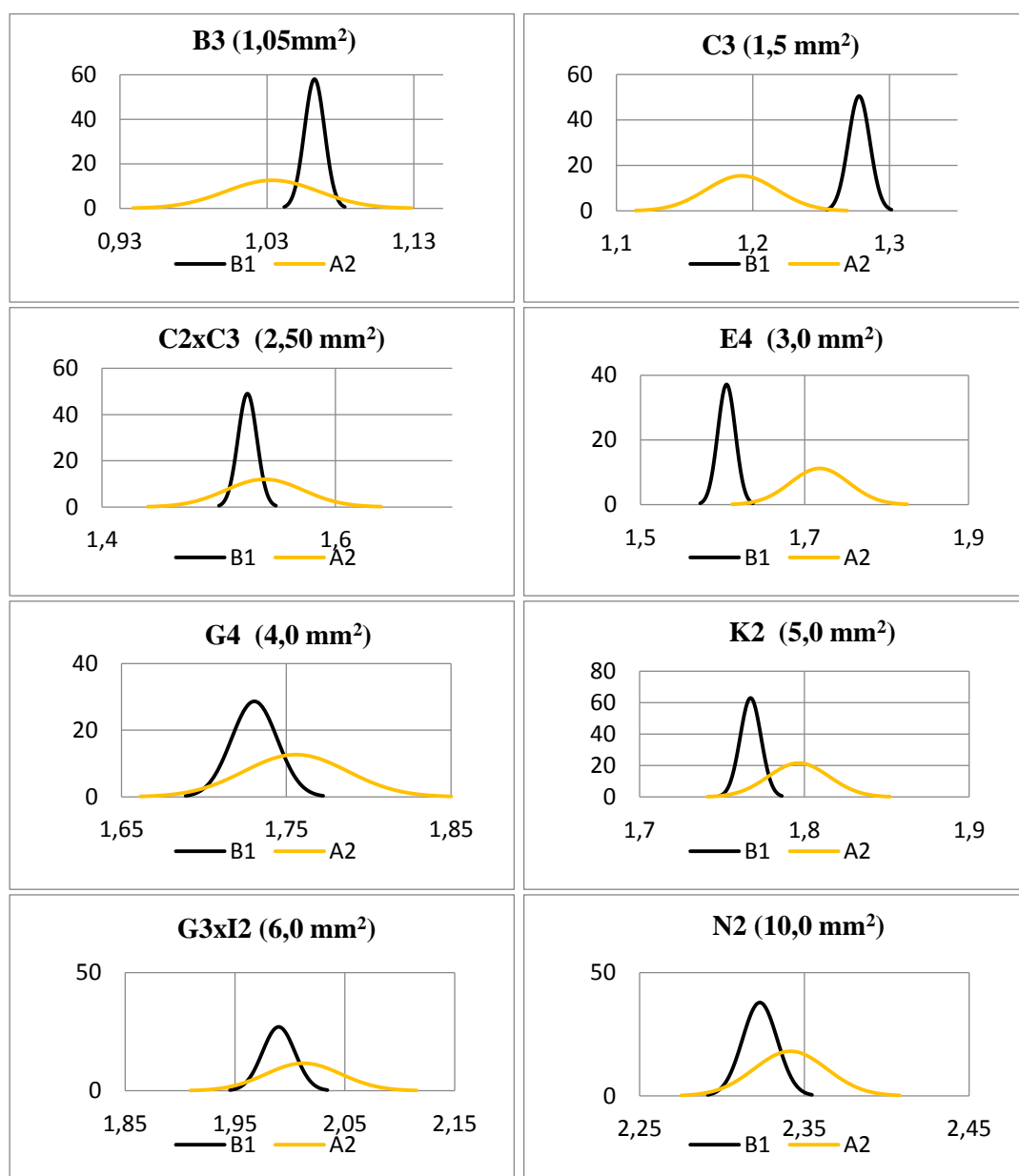


Figura 5.6 - Gráficos resultantes dos ensaios de estabilidade entre o equipamento B1 e A2

Para estudar a tendência ao longo dos ensaios construíram-se os gráficos representados na Figura 5.5 para as diferentes configurações partindo dos valores de altura final medida nos equipamentos B1 e A2.

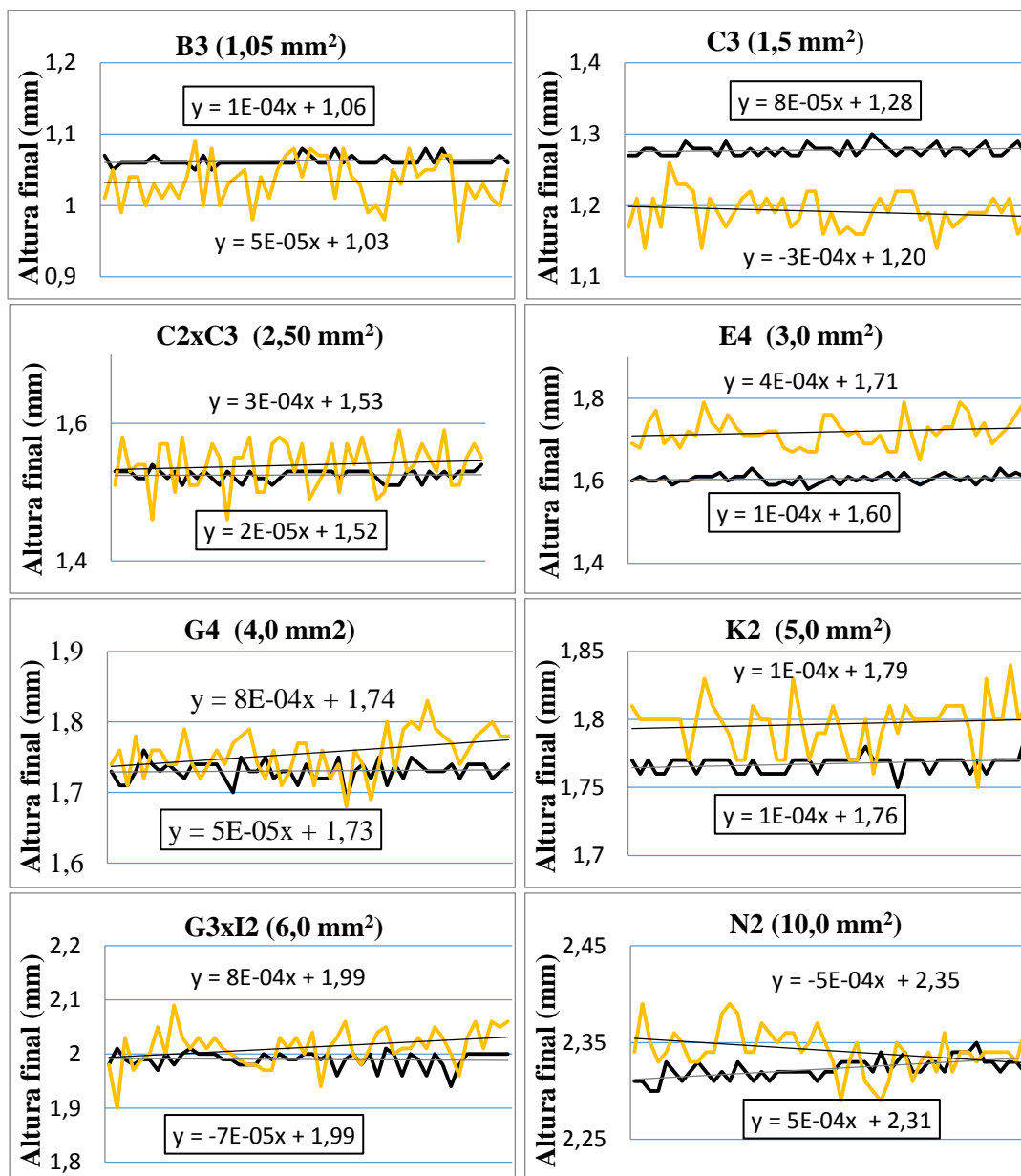


Figura 5.7 - Gráficos de tendência dos ensaios de estabilidade para os equipamentos B1 e A2

Destes gráficos é possível verificar que o equipamento A2 apresentou uma menor tendência para a configuração B3 e tendências semelhantes para as configurações K2 e N2. Para as restantes 5 secções o equipamento B1 apresenta uma menor tendência da altura final de soldadura.

Análise de estabilidade de secções de dimensão elevada e cadência de produção alta

Utilizando os dados estatísticos da altura final da soldadura dos vários equipamentos para a configuração M3 construiu-se os gráficos de estabilidade para efetuar a comparação entre o equipamento B1 e o equipamento A3. Estes gráficos encontram-se representados na Figura 5.8, estando representado a cor preta e cinza as curvas de estabilidade dos valores de altura final para o equipamento B1, sendo que a curva de cor preta representa as soldaduras que foram realizadas com a cadência de 9 soldaduras por minuto e a cor cinza representa as soldaduras realizadas com a cadência de 6 soldaduras por minuto.

Nessa mesma figura encontram-se também representadas a cor azul escuro e azul claro, as curvas de estabilidade de valores de altura final do equipamento A3, sendo que a cor azul escuro representa as soldaduras realizadas com uma cadência de 9 soldaduras por minuto e a cor azul claro representa as soldaduras realizadas com a cadência de 6 soldaduras por minuto.

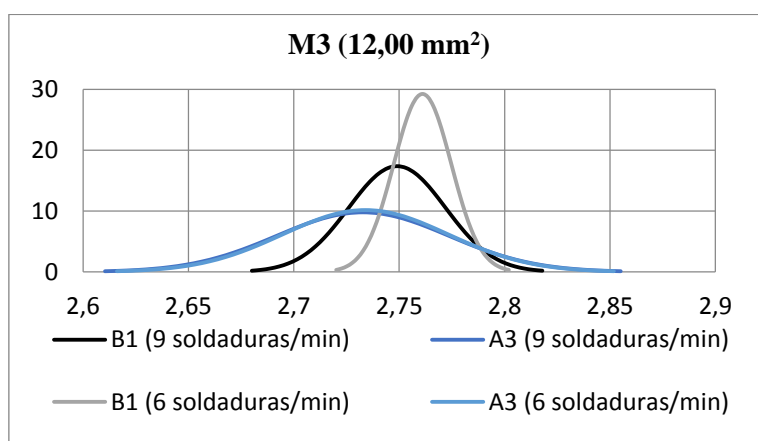


Figura 5.8 - Gráfico para comparação de estabilidade de ambos os equipamentos em secções elevadas com cadências de 6 e 9 soldaduras por minuto

Verifica-se através da análise dos gráficos de estabilidade da Figura 5.8 que a cadência de produção não tem influencia na estabilidade para o equipamento A3, já no equipamento B1 quanto maior a cadência, maior a instabilidade. No entanto este apresenta uma maior estabilidade de valores de altura final inclusive para a pior situação possível, em que é efetuada uma soldadura sem que exista o arrefecimento na totalidade do *tooling*.

Para análise da tendência do equipamento B1 e A3 construíram-se os gráficos representados na Figura 5.9 e 5.10. representando o gráfico Figura 5.9 a estabilidade do equipamento B1 para uma cadência de 6 e 9 soldaduras por minuto, e o gráfico representando na Figura 5.10 a estabilidade do equipamento A3 para uma cadência de 6 e 9 soldaduras por minuto.

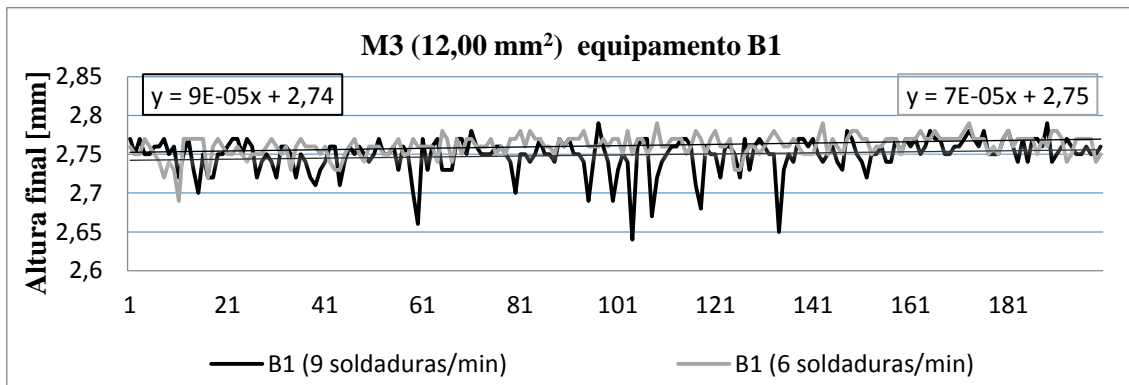


Figura 5.9 - Curvas de tendência da configuração M3 para o equipamento B1

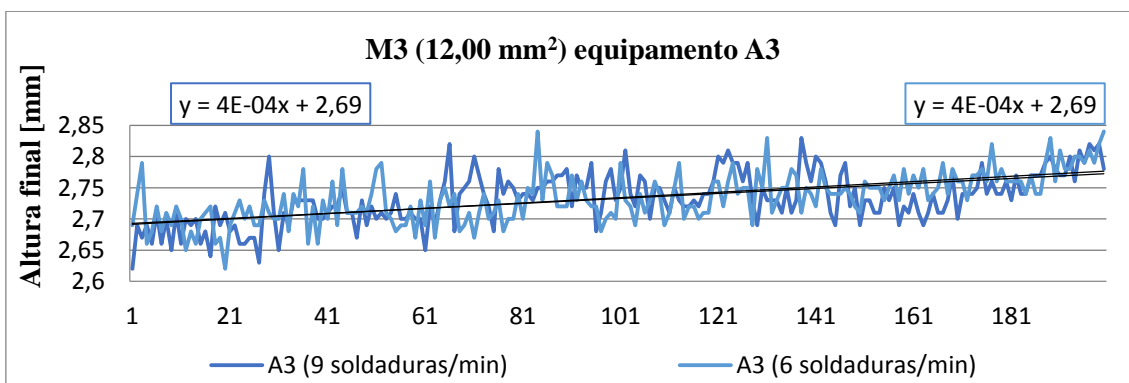


Figura 5.10 - Curvas de tendência para a configuração M3 para o equipamento A3

Analisando o gráfico de tendência do equipamento B1 verifica-se que para uma cadência mais elevada existe uma maior flutuação dos valores da altura final no entanto este apresenta uma tendência semelhante para as diferentes cadências.

Analisado o gráfico de tendência do equipamento A3 representada na Figura 5.10 verifica-se que a sua tendência não dependa da cadência, possuindo este equipamento uma tendência e flutuação de valores da altura final de soldadura superior ao equipamento B1.

5.4 RESULTADOS DAS VERIFICAÇÕES DA PRECISÃO DE LEITURA

Apos as 11 medições, verificou-se qual o maior erro de leitura de cada um dos equipamentos para a altura final e largura de soldadura, com base nesses valores construíram-se os gráficos da Figura 5.11 e 5.12. Encontrando-se representando valor máximo de erro da medição da altura final de cada equipamento para as diferentes configurações na Figura 5.11, e o valor máximo de erro de leitura da largura de soldadura para os mesmos equipamentos e configurações na Figura 5.12.

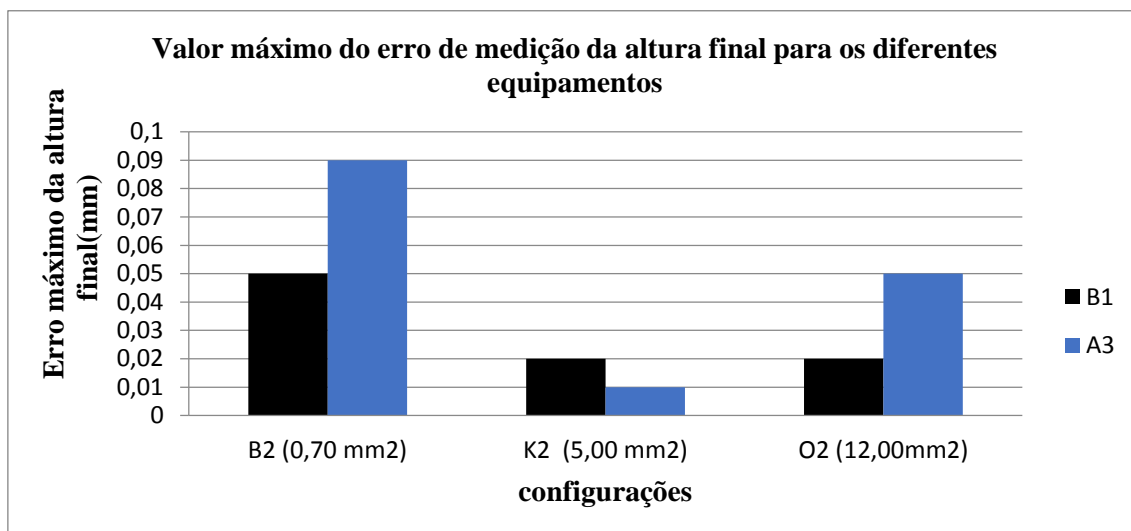


Figura 5.11 - Valor máximo do erro de medição da altura final para os diferentes equipamentos

Analisando o valor do erro de leitura para os diferentes equipamentos verifica-se que o equipamento B1 apresenta valores mais precisos de leitura para as configurações B2 e O2, este é superado pelo equipamento A3 na configuração K2 no entanto o equipamento B1 apresenta uma boa precisão de leitura sendo o seu erro máximo de leitura de 20 μm .

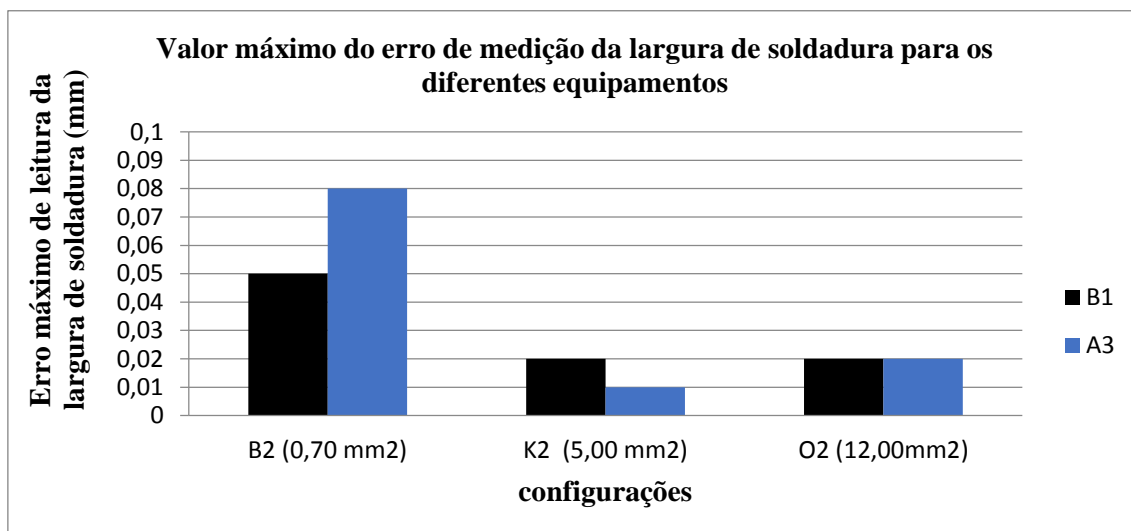


Figura 5.12 - Valor máximo do erro de medição da largura de soldadura para os diferentes equipamentos

Da análise da Figura 5.12 verifica-se que o equipamento B1 apresenta um menor erro de leitura na configuração B2 e erro de leitura igual ao do equipamento A3 para a secção O2, no entanto o equipamento A3 revelou-se muito preciso para a configuração K2 apresentando um erro máximo de leitura da altura final e largura de soldadura de 10 μm .

5.5 RESULTADOS DOS TESTES DE PERFORMANCE DOS EQUIPAMENTOS

5.5.1 Ensaios de Fadiga

Os resultados dos ensaios de fadiga para as diferentes configurações com os vários reforços da zona de soldadura encontram-se representados na Figura 5.13.

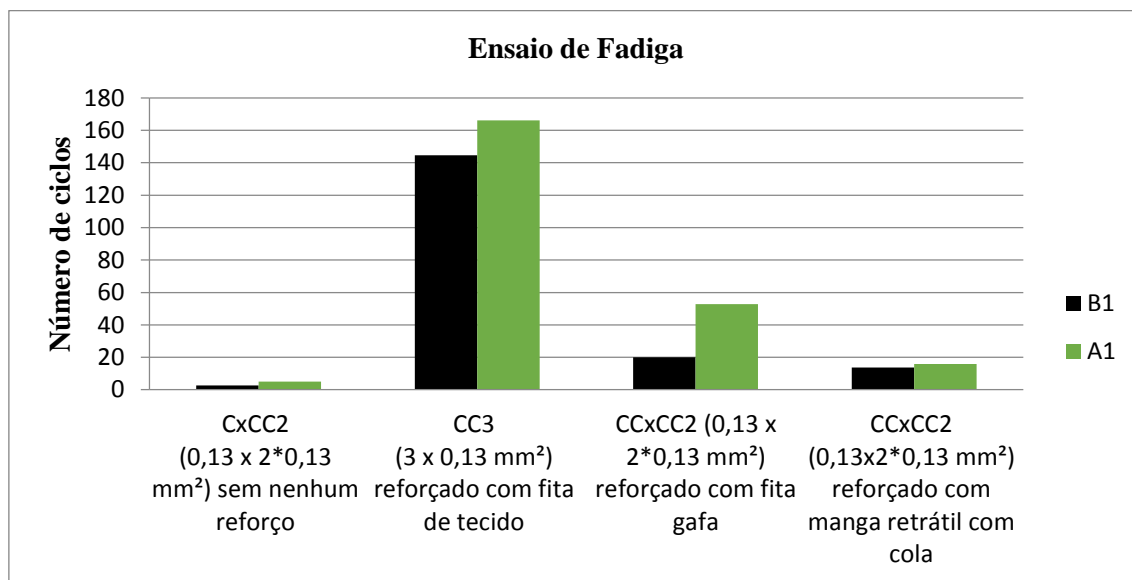


Figura 5.13 – Resultados dos ensaios de fadiga

É possível verificar analisando a Figura 5.13 que o equipamento A1 proporciona melhores resultados nos ensaios de Fadiga que o equipamento B1, que a configuração mais resistente é a configuração de geometria cega CC3 e esta resiste 2 vezes mais aos ciclos de fadiga. Das Configurações de geometria cruzada o reforço de soldadura que proporciona melhores resultados é o reforço da soldadura com fita-cola do tipo gafa.

5.5.2 Ensaios de dobragem

Para os ensaios de dobragem considerou-se a força mínima requerida de 15 N foi escolhida esta força por ser o valor mínimo obtido nos ensaios da soldadura pelo equipamento que apresentou melhores resultados não revelando assim a força que a empresa considera como a mínima admissível, para proteção da mesma, todas as solduras foram efetuadas utilizando os parâmetros *standard* de cada um dos equipamentos.

Os resultados dos ensaios de dobragem para o equipamento A1 e B1 encontram-se representados na Tabela 5.2 e 5.3 respetivamente. Estas tabelas encontram-se com um esquema de cores para facilitar a leitura das mesmas, sendo que cor verde representa valores da força

acima do mínimo, qualquer outra cor representa que a força de dobragem se encontra abaixo do mínimo definido.

Tabela 5.2 - Resultados dos ensaios de dobragem do equipamento A1

	CC	B	CC2	BCC	CC	CC3	BCC2	BCC	CC2
Configuração	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	CC2	CC	CC2	CC	C	CC2	CC	CC2	C
Secção (mm ²)	0,39	0,48	0,52	0,61	0,63	0,65	0,74	0,74	0,76
1	22,4	17,8	24,0	35,6	28,6	75,6	52,4	55,6	65,8
2	24	26,2	25,6	32,6	29,0	59,4	53,6	64,2	51,4
3	26,2	17	31,2	29,6	31,6	81,4	67,4	54,0	73,0
4	29,2	15,8	33,0	35,8	34,6	82,0	59,4	63,6	53,8
5	21,2	19	34,6	32,8	28,0	53,4	58,0	57,0	66,4
6	21,2	18,6	19,0	37,2	27,2	57,8	58,0	49,0	74,4
7	19,8	20,2	43,6	30,8	31,6	69,8	55,8	65,4	77,4
8	29	17,4	33,4	28,8	35,6	61,0	48,2	62,6	65,2
9	28,2	20,2	37,2	29,4	31,6	88,0	57,8	62,0	76,8
10	31	20,8	37,0	31,2	31,4	53,8	53,0	68,4	50,6
11	26,6	15,8	29,6	32,2	34,2	71,8	57,4	55,4	50,4
12	21,2	15,0	24,0	35,0	34,4	65,2	55,6	68,4	49,6
13	19,2	20,8	24,0	34,8	31,8	54,4	58,0	65,4	52,0
14	23	17,4	36,6	33,8	27,0	62,4	59,0	56,4	47,0
15	26,2	18,4	47,0	34,8	30,2	54,0	44,2	62,2	50,8
Valor mínimo de força no ensaio de dobragem	19,2	15,0	19,0	28,8	27,0	53,4	44,2	49,0	47,0

Tabela 5.3 – Resultados dos ensaios de dobragem do equipamento B1

	CC	B	CC2	BCC	CC	CC3	BCC2	BCC	CC2
Configuração	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	CC2	CC	CC2	CC	C	CC2	CC	CC2	C
Secção [mm ²]	0,39	0,48	0,52	0,61	0,63	0,65	0,74	0,74	0,76
1	19,2	9,2	32,2	20,2	15,4	43,0	24,6	28,8	25,0
2	13,8	11,2	32,6	21,0	12,4	35,4	29,6	34,2	25,4
3	10,6	11,8	27,2	22,4	15,6	48,6	30,6	32,0	28,0
4	13,2	12,2	29,2	20,6	20,8	47,0	24,2	32,6	25,4
5	14,0	15,0	29,2	22,0	14,0	35,6	25,4	30,0	26,2
6	11,8	12,0	29,4	19,8	14,0	39,6	23,2	35,0	28,2
7	11,2	9,6	41,4	18,2	14,2	41,8	29,0	27,2	32,6
8	14,2	9,0	28,6	17,6	18,8	55,4	24,2	33,6	24,6
9	17,8	16,2	27,6	23,4	15,8	39,0	24,2	32,2	26,0
10	11,2	8,4	29,6	17,4	17,8	44,0	33,0	33,6	26,8
11	11,0	14,2	28,4	21,6	20,2	32,2	26,2	34,4	33,4
12	14,2	10,6	26,8	20,8	20,2	42,8	33,2	28,8	28,8
13	12,8	10,8	29,6	24,8	23,6	42,4	27,2	32,0	28,6
14	19,8	9,6	32,6	22,2	23,2	40,0	25,2	32,2	31,6
15	20,8	15,2	32,6	23,8	18,2	43,4	28,2	29,0	33,2
Valor mínimo de força no ensaio de dobragem	10,6	8,4	26,8	17,4	12,4	32,2	23,2	27,2	24,6

É possível verificar através da análise da Tabela 5.2 e 5.3, que o equipamento A1 apresentou todos os valores de força necessário para a dobragem superiores a 15N. No equipamento B1, esse patamar de força só foi atingido para configurações com mais de 3 multifilares da liga de cobre ou para secções superiores a 0,74 mm² quando existia a mistura de materiais. Este ensaio vai de acordo com os ensaios de tração realizados e mostra que clips em que o material soldado seja apenas a liga de cobre apresenta melhores valores de resistência a dobragem comparados com uma secção de secção superior.

5.5.3 Ensaios de *pull* e *peel*

Ensaios de *Pull*

Para análise dos resultados dos ensaios de destrutivos de *pull* efetuou-se o cálculo do C_{pk} utilizando a força média resultantes dos ensaios destrutivos de *pull*, o desvio padrão da força e como valor mínimo da força representados em função da configuração na Tabela 5.4, estes são os valores mínimos de força requerida pelo cliente mais exigente, sendo esta a força mínima que terá que resistir o cabo de menor secção durante a montagem. Os valores de C_{pk} para cada configuração para os diferentes equipamentos encontram-se representados na Figura 5.14.

Tabela 5.4 – Valores mínimos para cálculo do C_{pk} dos ensaios de *Pull*

Configuração (secção)	CC3xCC2 (0,65 mm ²)	B2xC3 (2,2 mm ²)	C2xC3 (2,5 mm ²)	E2xG3 (4,5 mm ²)	G3xI2 (6,0 mm ²)
Valor min. Força (N)	34,0	60,0	80,0	120,0	160,0

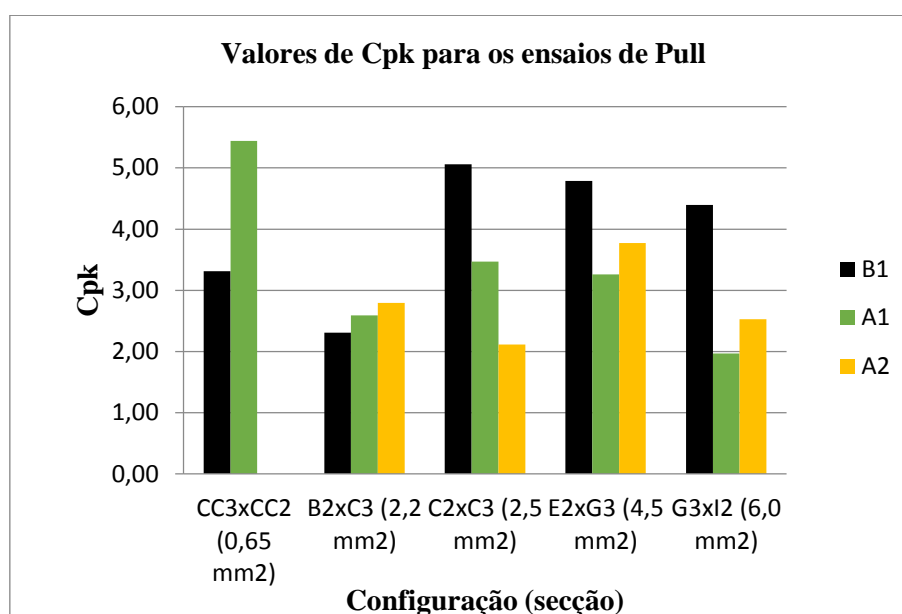


Figura 5.14 - Resultados dos ensaios de pull para os diferentes equipamentos

Analisa a Figura 5.14, verifica-se que todos os ensaios para os diferentes equipamentos obtiveram um valor de C_{pk} superior 1,67, sendo este indicados para efetuar as soldaduras utilizando os parâmetros *standard* de cada um dos equipamentos. Apresentando o equipamento A1 melhores resultados na secção mais pequena de 0,65 mm², no entanto este equipamento foi projetado para secções muito pequenas, apresento piores valores para as secções superiores.

Efetuada o cálculo do valor médio de C_{pk} para as diferentes configurações como representado na Figura 5.15 verifica-se que o equipamento B1 foi o que obteve o melhor valor médio de C_{pk} , ao longo dos ensaios realizados.

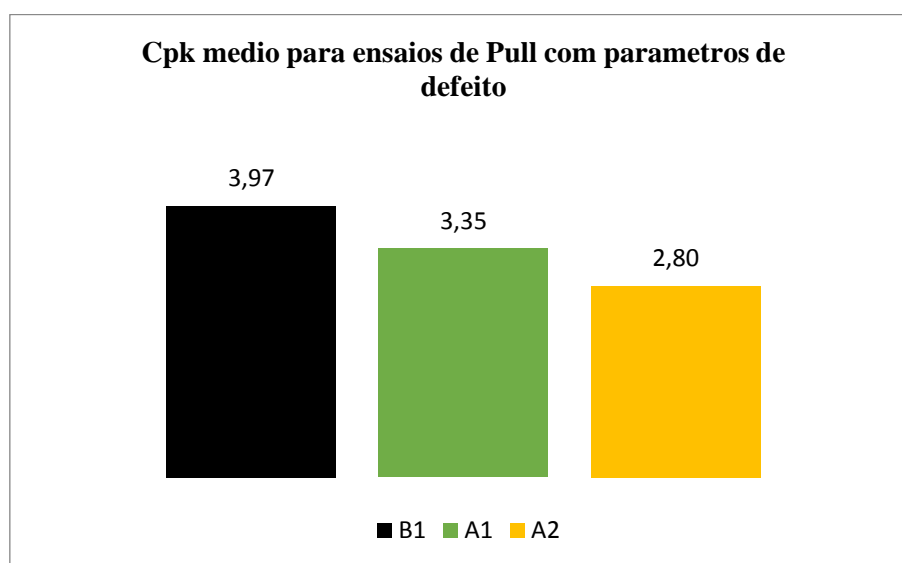


Figura 5.15 - Média dos valores de C_{pk} para os ensaios de Pull

Ensaio de Peel

Para análise dos resultados dos ensaios de destrutivos de peel efetuou-se o cálculo do C_{pk} utilizando a força média resultantes dos ensaios destrutivos de *pell*, o desvio padrão da força e como valor mínimo da força representados em função da configuração na Tabela 5.5, sendo estes valores diferentes dos valores utilizados pela empresa, para não revelar os valores de controlo utilizado pela mesma. Os valores de C_{pk} para cada configuração para os diferentes equipamentos encontram-se representados na Figura 5.16.

Tabela 5.5 – Valores mínimos para cálculo do C_{pk} dos ensaios de Peel

Configuração (secção)	CC5 (0,65 mm ²)	B3 (1,05 mm ²)	C3 (1,5 mm ²)	E4 (3 mm ²)	G4 (4 mm ²)
Valor min. Força (N)	10,0	12,0	15	24,0	35

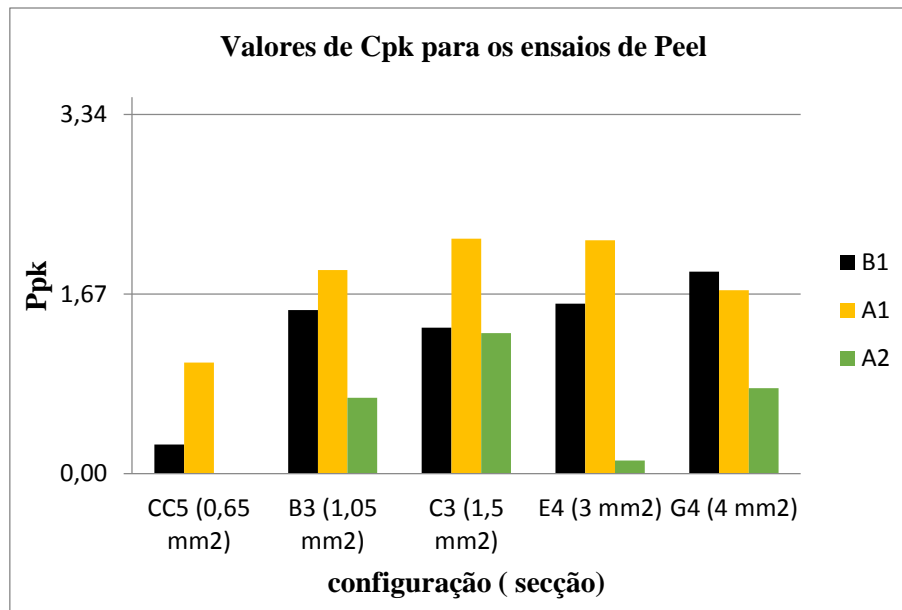


Figura 5.16 - Resultados dos ensaios de peel para os diferentes equipamentos

Analisando a Figura 5.16 verifica-se nenhum dos equipamentos obteve um valor de C_{pk} superior a 1,67 em todas a configurações, sendo o equipamento A1 o que obteve os melhores resultados em todas as configurações com exceção de configuração G4. Este equipamento foi projetado para as secções de dimensão menores.

5.5.4 OTIMIZAÇÃO DA configuração C3 (1,5 mm²)

Para a otimização da secção C3 utilizaram-se os dados da validação para o equipamento A3. Nos ensaios realizados anteriormente verificou-se que era possível transpor todos os parâmetros com exceção da pressão, pois os valores de força aplicados a soldadura para uma pressão igual originaram uma diferente compactação. A variação de pressão utilizada encontra-se na Tabela 5.6

Tabela 5.6 – Parâmetros utilizado para efetuar a otimização

Configuração C3	Referencia	Min	Max.	Variação
Pressão [Bar]	2,6	2,0	2,8	0,2

Após a realização de 10 soldaduras para cada uma das diferentes pressões, e usando o valor médio de força e o desvio padrão dos ensaios destrutivos, calculou-se o valor de C_{pk} para cada uma das pressões. O valor de C_{pk} em função de cada uma das pressões encontra-se representado na Figura 5.17, sendo a pressão de 2,2 Bar a que origina melhores valores de C_{pk} para a configuração C3.

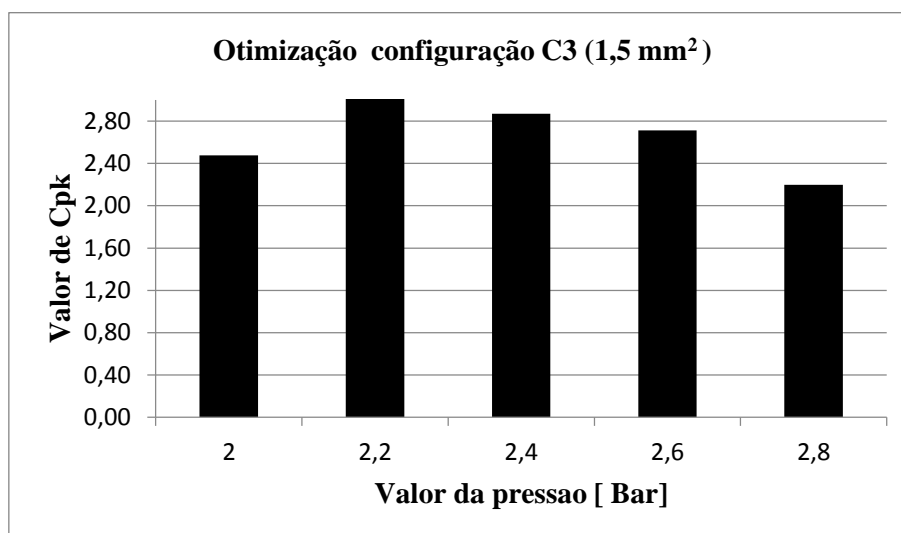


Figura 5.17 - Valor de C_{pk} em função da pressão para os ensaios de otimização

Após verificar qual o valor de pressão que originava melhores resultados de C_{pk} , efetuaram-se 50 soldaduras com a pressão de 2,2 para o equipamento B1 e, para o equipamento A3, 50 soldaduras com os parâmetros de validação.

Utilizando os valores médios, desvio padrão e o limite inferior da especificação de 15 N, calcularam-se os valores de C_{pk} para o equipamento B1 e A3, encontrando-se estes representados na Figura 5.18.

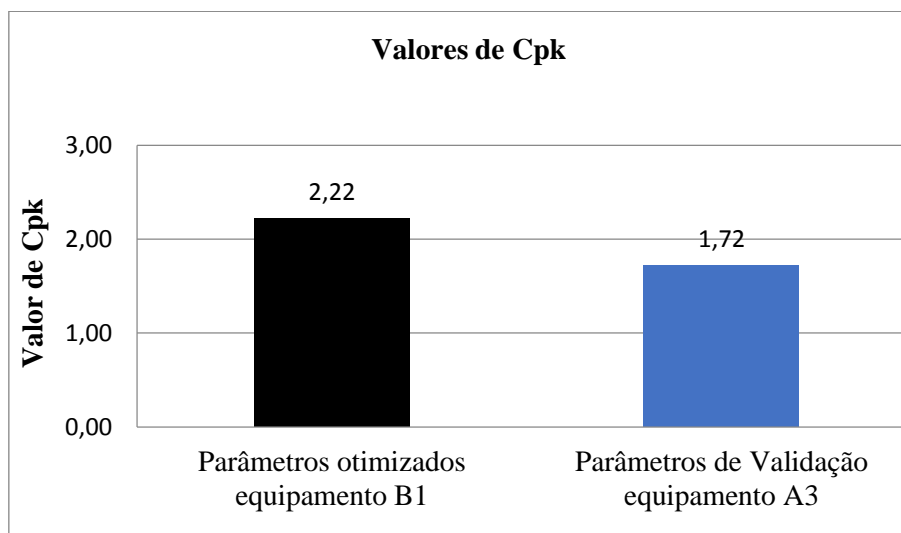


Figura 5.18 - Valores de C_{pk} para configuração C3 após otimização de parâmetros

Neste processo de otimização verificou-se também que altura final média do clip era igual 1,17 mm para ambos os equipamentos, no entanto o equipamento B1 apresentou um C_{pk} superior ao do equipamento A3. Verificando se o valor de C_{pk} do equipamento B1 após otimização de 2,22 é superior ao valor de C_{pk} obtido no equipamento A1 de 1,72 obtido com os

parâmetros *standard* do mesmo, mostrando que o equipamento B1 após otimização apresenta uma qualidade equivalente ou superior da soldadura comparado com o equipamento A1 projetado para essas secções de pequena dimensão.

5.6 DEFEITOS NAS SOLDADURAS

Os resultados do número de defeitos para 100 soldaduras, para uma secção pequena, intermédia e grande com uma cadência produção de 3 soldaduras por minuto, encontram-se representados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Defeitos de soldadura secção pequena, média e grande

Configuração (secção)	B1			A3		
	Oxidação do cobre	Corte de multifilares	<i>Loops</i>	Oxidação do cobre	Corte de multifilares	<i>Loops</i>
B2 (0,70 mm ²)	0	0	0	0	2	0
K2 (5,00 mm ²)	0	0	13	0	3	5
O2 (12,00 mm ²)	0	0	0	20	0	0

Analisando essa tabela verifica-se que, para uma secção pequena, o equipamento B1 apenas apresentou defeitos de *loops* dos multifilares para a configuração intermedia K2 (5,00 mm²), o equipamento A3 apresentou defeitos de soldadura em todas as configurações testadas. Estimando que das 1500 soldaduras efetuadas por dia, 600 serão de pequena dimensão, 600 de dimensão intermédia e 300 de secção grande, serão rejeitadas 78 soldadura para o equipamento B1 e 120 para o equipamento A3.

Os resultados do número de defeitos para 100 soldaduras, relativas à secção de 12 mm², para uma cadência de 6 soldadura por minuto e 9 soldaduras por minuto, encontram-se representados na Tabela 5.8. Pode constatar-se a partir da análise dessa tabela que, o aumento de cadência de produção para o equipamento B1 origina um aumento de arrancamento de multifilares, no entanto esse aumento de cadência não tem qualquer influência no número de *loops*. No equipamento A3 o aumento de cadência influencia o número de soldaduras em que ocorre a oxidação do cobre, sendo recomendável face a estes resultados, que seja implementado um sistema de arrefecimento do *tooling* por ar comprimido, para dissipar a enorme quantidade

de calor acumulado no *tooling*, reduzindo o número de clips oxidados devido ao aumento de temperatura do *tooling*.

Tabela 5.8 – Defeitos de soldadura numa secção elevada e com cadências elevadas

Configuração (secção)	Telsonic B1			Schunk A3		
	Oxidação do cobre	Corte de multifilares	<i>Loops</i>	Oxidação do cobre	Corte de multifilares	<i>Loops</i>
M3 (12,00 mm ²) 6 Soldaduras por minuto	0	2	7	9	0	0
M3 (12,00 mm ²) 9 Soldaduras por minuto	0	5	7	24	0	0

Os resultados do número de defeitos na soldadura devidos a troca de uma secção de dimensões elevadas para uma secção de pequenas dimensões, encontram-se representados na Tabela 5.9, cuja análise revela que não existem defeitos de arrancamentos de multifilares para o equipamento B1. Estes defeitos não existem pois este equipamento efetua um auto ajuste das folgas. O equipamento A3, por não possuir esse auto ajuste das folgas, quando se encontra a efetuar soldadura de dimensões elevadas tem tendência a aumentar as folgas entre as peças do *tooling* perante a troca de para uma secção de dimensões reduzidas. Devida à incapacidade de compensar as folgas existentes, origina um maior arrancamento dos multifilares de cobre.

Tabela 5.9 – Defeitos de soldadura em modo de sequência

Nº soldaduras	Configuração (secção)	Telsonic B1			Schunk A3		
		Oxidação do cobre	Corte de multifilares	Loops	Oxidação do cobre	Corte de multifilares	Loops
10	P3 (21,00 mm ²)	0	0	0	0	1	0
	G (1,00 mm ²)	0	0	0	0	5	2
20	P3 (21,00 mm ²)	0	0	1	0	1	2
	G (1,00 mm ²)	0	0	0	0	7	0
50	P3 (21,00 mm ²)	0	0	5	0	0	0
	G (1,00 mm ²)	0	0	11	0	22	0

5.7 RESULTADOS DOS TESTES AO TEMPO DE ARRANQUE DO REPOUSO E MANUTENÇÃO DOS DIFERENTES EQUIPAMENTOS

Tempo de arranque a partir do repouso

Verificou-se que o equipamento B1 em média demorava 53 segundos a iniciar o seu sistema, que a sua calibração automática consumia em média 22 segundos totalizando 1 minuto e 15 segundos ate que este equipamento esteja operacional

No equipamento A3 que é o mais rápido a ficar operacional necessitou em média de 1 minuto e 55 segundos.

É de notar que apesar do equipamento B1 apesar de necessitar de efetuar uma calibração automática que lhe consume 22 segundos, este é 40 segundos mais rápido a ficar operacional.

Tempo de manutenção

O tempo de manutenção das peças que sofrem maior desgaste do *tooling* encontra-se representada na Tabela 5.10 e 5.11, verificando-se que o equipamento B1 necessita mais tempo para desmontar cada um dos componentes no entanto devido a sua calibração automática o tempo de manutenção é muito inferior quando comparado com o equipamento do fornecedor A.

Tabela 5.10 - Tempo de desmontagem e montagem do sonótrodo em ambos os equipamentos

Equipamento	B1	A3
Tempo de desmontagem do sonótrodo	4 minutos 17 segundos	1minunto 56 segundos
Tempo de montagem do sonótrodo e calibração	10 minutos	22 minutos 4 segundos
Tempo necessário para que o equipamento fique operacional	14 minutos 17 segundos	24 minutos

Tabela 5.11 - Tempo de desmontagem e montagem da bigorna e placa de retoque em ambos os equipamentos

Equipamento	B1	A3
Tempo de desmontagem da bigorna e placa de retoque	2 minutos 40 segundos	2 minutos 33 segundos
Tempo de montagem da bigorna e placa de retoque	8 minutos	24 minutos 39 segundos
Tempo necessário para que o equipamento fique operacional	10 minutos 40 segundos	27 minutos 12 segundos

6 CONCLUSÕES E PROPOSTA DE TRABALHO FUTURO

6.1 CONCLUSÕES

Do trabalho realizado pode concluir-se o seguinte:

- A soldadura por ultrassons obriga ao controlo de um conjunto de parâmetros relativamente vasto;
- O tempo de soldadura é um parâmetro de controlo de processo muito importante que depende da contaminação superficial dos multifilares;
- A dureza do material utilizado na ligação é igualmente importante, uma vez que quanto maior for a dureza, maior tem de ser a pressão e a energia para compactar o material de modo a eliminar a existência de espaços vazios entre os multifilares;
- A qualidade da superfície dos fios é muito importante para a qualidade de soldadura obtida sendo esta qualidade analisada através de ensaios de corte e arrancamento;
- Verificou-se que os ensaios de arrancamento (*peeling*) requerem valores de força muito inferiores aos requeridos pelos ensaios de corte (*pull*), consequentemente, otimizando o processo para uma dada secção e avaliando a força necessária para realizar ensaios de arrancamento resulta em bons resultados da força de corte;
- Quanto maior a compactação maior a resistência dos ensaios de arrancamento, no entanto existe uma diminuição da força quando se ultrapassa a compactação máxima devido a extrusão do multifilares;
- O equipamento B1 na maioria das configurações produziu uma compactação inferior à dos equipamentos A;
- A geometria do sonótrodo e da bigorna revelou-se importante nos ensaios de resistência mecânica obtendo-se melhores resultados em cliques de dimensão menor utilizando um sonótrodo e bigorna com maior número de ondas e com uma largura de soldadura menor;
- Todos os equipamentos analisados propõem janelas de qualidade mais amplas para as secções maiores devido ao rearranjo possível dos multifilares, possuindo estas secções maior número de fios e/ou diâmetros de multifilares superiores;
- O equipamento B1 permitiu realizar soldaduras com menor variação da altura de junta e menos rejeições.

- Verificou-se uma dificuldade de ajuste de parâmetros em soldaduras envolvendo diferentes materiais, com propriedades diferentes.
- Podem ser utilizados os dados das validações dos equipamentos A2/A3 utilizando os parâmetros e de pressão, amplitude e largura de soldadura e ajustando o valor de pressão do equipamento B1;
- No global, o equipamento B1 apresenta melhores resultados, não sendo este recomendado para processamento de fio cujo material seja a ligas de cobre pouco dúcteis sem que seja criado um *tooling* de dimensões inferiores.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTURO

Testar o efeito de descontaminação dos multifilares efetuada pelo equipamento B1 e comparar com os resultados da limpeza superficial manual.

Analisar o efeito do batente e do dispositivo de posicionamento de fios dos diferentes equipamentos. Na estabilidade de soldadura e na força medida nos ensaios destrutivos.

Introduzir rugosidade nas superfícies da placa de retoque e garra deslizante que ficam em contacto com os multifilares durante a soldadura de modo a reduzir os escorregamentos dos multifilares reduzindo assim o número de *loops*.

BIBLIOGRAFIA

- [1] http://delphi.com/about/news/media/pressReleases/2011/pr_2011_03_01_001/
- [2] V. Chiaverini, Tecnologia Mecânica- "Estrutura e Propriedades das ligas metálicas", 2ª ed., vol. I, São Paulo: McGraw-Hill, 1986, pp.12-38,57,84-117.
- [3] A. H. Cottrell, "Introdução à metalurgia", 3ª ed., Av. de Berna, Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1975, pp.238-244,698-703,758-762, ISBN:972-31-0188-2.
- [4] P. M. Jorge Rodrigues, Tecnologia Mecânica-"Tecnologia de deformação Plástica", 1ª ed., Lisboa: Escolar editora, 2010, ISBN 978-972-592-279-8
- [5] http://delphi.com/pdf/contact/brochures/eearchitecture_english.pdf
- [6] Norma DIN En 13602
- [7] V. Chiaverini, Tecnologia Mecânica-"Materiais da Construção Mecânica ", 2ª ed., vol. III, São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
- [8] J.R.Davis, ASM Specialty Handbook-"Copper and Copper Alloys", United States of America: ASMInternational, 2001, ISBN:0-87170-726-8.
- [9] D. V. Zhmurkin, N. E. Corman, C. D. Copper, and R. D. Hilty, "3-Dimensional numerical simulation of open-Barrel crimping process," in *Electrical Contacts, Proceedings of the Annual Holm Conference on Electrical Contacts*, 2008, pp. 178–184.
- [10] R.S. Timsit, "Contact Properties of Tubular Crimp Connections: Elementary Considerations", in Proc. 54th IEEE Holm Conf. on Elec. Contacts, Orlando, 2008, pp. 161-167.
- [11] S. Ogihara, K. Takata, Y. Hattori and K. Yoshida, "Mechanical Analysis of the Crimping Connection", Proc. 52nd IEEE Holm Conf. on Elect. Contacts, pp. 89-94, 2006.
- [12] <http://www.komaxgroup.com/en/Wire/Products-and-Solutions/Products/Crimper/>
- [13] M. F. Ashby, "Material Selection in Mechanical Design", 3ª ed. Elsevier B.V., 2005, ISBN 0-7506-6168-2
- [14] PEREIRA, R.M.; CUNHA, J.G. e GOMES, J.R.. "Desgaste de ferramentas de soldadura por ultra-sons na produção de cablagens eléctricas para automóveis". C.Tecn. Mat. [online]. 2006, vol.18, n.1-2 [citado 2014-07-14], pp. 65-72 . Disponível em: <http://www.scielo.gpeari.mctes.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0870-83122006000100010&lng=pt&nrm=iso>.
- [15] R. Jahn, R. Cooper, D. Wilkosz, "The Effect of Anvil Geometry and Welding Energy on Microstructures in Ultrasonic Spot Welds of AA6111-T4", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 38, Março 2007, p 570-583.
- [16] S.Heinz ,G.Wagner, D. Eifler , "Ultrasonic Welding of Wires and Cables" , JOM, Volume 64, Issue 3 , pp 421-426.

- [17] Kuprys, T. T., Janutėnienė, J. J., & Didžiokas, R. R. (2007). "Strength of copper wire connections welded" by ultrasonic. *Mechanika*, 65(3), 30-33.
- [18] H. Dubbel, W. Beitz, K.H.Kuttner, "Handbook of mechanical engineering", Springer-Verlag, 1994, pp. D25, F5, K84-K85, ISBN 0-387-19868-7
- [19] G. Wagner, F. Balle, D. Eifler, "Ultrasonic Welding of Hybrid Joints", *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, March 2012, Volume 64, Issue 3, pp 400-406.
- [20] ASM Handbook Committee, *Metals Handbook Volume 6: Welding, Brazing and Soldering*, vol. 6, 9^a edição; ISBN 0-87170-382-3.
- [21] Zhao, Y Y ; Li, D ; Zhang, Y S, "Effect of welding energy on interface zone of Al-Cu ultrasonic welded joint", *Science and Technology of Welding & Joining*, 18, 4, 354-360,
- [22] de Vries, E. (2004). *Mechanics and mechanisms of ultrasonic metal welding*. (Electronic Thesis or Dissertation). Retrieved from <https://etd.ohiolink.edu/>
- [23] Fernandes, A. (2007). *Desenvolvimento de Software de Controlo Estatístico de Qualidade e Análise Experimental das Ligações Realizadas por Soldaduras por Ultra-sons e Cravamento em Cablagens para a Indústria Automóvel*.
- [24] Shailendra Yadav, Charalabos Doumanidis, "Thermomechanical Analysis of an Ultrasonic Rapid Manufacturing (URM) System", *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 7, Issue 2, 2005, Pages 153-161.
- [25] Kuttruff, Heinrich, "Ultrasonics Fundamentals and Applications", Elsevier Science Publishers, p 406-417, 1991, ISBN 1-85166-553-6
- [26] Jatinder Kumar, "ULTRASONIC MACHINING—A COMPREHENSIVE REVIEW", *Machining Science and Technology: An International Journal*, Volume 17, Issue 3, 2013, p 325-379
- [27] H.P.C. Daniels, "Ultrasonic welding, Ultrasonics", Volume 3, Issue 4, October–December 1965, Pages 190-196
- [28] Hart, B. (2014). "Microstructural Characterization of Aluminum Cables and Ultrasonically Welded Terminals for Electric/Hybrid Electric Vehicles". (Electronic Thesis or Dissertation). Retrieved from <https://etd.ohiolink.edu/>
- [29] Jacquemod, A; Tock, J.P.; Balaguer, J. M.; Laurent, F.; Vaudaux, L., "Qualification and Start of Production of the Ultrasonic Welding Machines for the LHC Interconnections," *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on*, vol.16, no.2, pp.1729-1732, June 2006
- [30] S. Elangovan, S. Semeer, K. Prakasan, "Temperature and stress distribution in ultrasonic metal welding—An FEA-based study", *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 209, Issue 3, 1 February 2009, Pages 1143-1150
- [31] Murat Guney, Es, "Modeling of multilayered piezoelectric transducers with ultrasonic welding application", *Smart Materials and Structures*, 2007, Vol.16(2), pp.541-554
- [32] Kang, Bongsu ; Cai, Wayne ; Tan, Chin-An, "Vibrational energy loss analysis in battery tab ultrasonic welding", *Journal of Manufacturing Processes*, 2014, Vol.16(2), pp.218-232

- [33] Carboni, M, “Failure analysis of two aluminium alloy sonotrodes for ultrasonic plastic welding”, *International Journal Of Fatigue*, 2014, Vol.60, pp.110-120
- [34] M. Roopa Rani, R. Rudramoorthy, “Computational modeling and experimental studies of the dynamic performance of ultrasonic horn profiles used in plastic welding”, *Ultrasonics*, Volume 53, Issue 3, March 2013, Pages 763-772
- [35] Valente, J. (2011). *Caracterização e Desenvolvimento da Soldabilidade por Ultra-Sons de Cablagens Multifilares de Secção Fina*
- [36] Elangovan, S ; Prakasan, K ; Jaiganesh, V, “Optimization of ultrasonic welding parameters for copper to copper joints using design of experiments”, *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, Vol.51(1-4), pp.163-171
- [37] Shakil, M. ; Tariq, N.H. ; Ahmad, M. ; Choudhary, M.A. ; Akhter, J.I. ; Babu, S.S., “Effect of ultrasonic welding parameters on microstructure and mechanical properties of dissimilar joints”, *Materials and Design*, 2014, Vol.55, pp.263-273
- [38] Cheng, X. ; Li, X; “Investigation of heat generation in ultrasonic metal welding using micro sensor arrays”, *Journal Of Micromechanics And Microengineering*, 2007, Vol.17(2), pp.273-282
- [39] Pouranvari, M. ; Marashi, S. ,” Failure Behavior of Three-Steel Sheets Resistance Spot Welds: Effect of Joint Design” , *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2012, Vol.21(8), pp.1669-1675
- [40] Deleryd, M. ; Vännman, K. , “Process capability plots—a quality improvement tool”, *Quality and Reliability Engineering International*, 1999, Vol.15(3), pp.213-227
- [41] NIST/SEMATECH,”*Engineering Statistics Handbook*”, IST/SEMATECH 2012, Cap. 6
- [42] Harthoorn, J.L., *Ultrasonic Metal Welding*, Technische Hogeschool Eindhoven, 1978
- [43] http://delphi.com/pdf/contact/brochures/eearchitecture_english.pdf

ANEXOS

ANEXO A-DADOS ESTATÍSTICOS PARA CONSTRUÇÃO DAS CURVAS DE ESTABILIDADE

Tabela A 1 - Dados estatísticos para construção das curvas de estabilidade entre o equipamento B1 e o equipamento A1

Configuração		B1	A1
CC2xCC (0,39 mm ²)	\bar{X} [mm]	0,838	0,773
	δ	0,005	0,009
	Dispersão da curva [μ m]	32,7	54,8
B3 (1,05 mm ²)	\bar{X} [mm]	1,062	1,015
	δ	0,007	0,013
	Dispersão da curva [μ m]	41,2	79,7
C3 (1,5 mm ²)	\bar{X} [mm]	1,278	1,172
	δ	0,008	0,014
	Dispersão da curva [μ m]	47,4	82,7
C2xC3 (2,5 mm ²)	\bar{X} [mm]	1,525	1,310
	δ	0,008	0,022
	Dispersão da curva [μ m]	48,8	131,7
E4 (3,0 mm ²)	\bar{X} [mm]	1,605	1,493
	δ	0,011	0,021
	Dispersão da curva [μ m]	64,4	125,1
G4 (4 mm ²)	\bar{X} [mm]	1,731	1,514
	δ	0,014	0,039
	Dispersão da curva [μ m]	83,5	235,3
E2xG3 (4,5 mm ²)	\bar{X} [mm]	1,836	1,681
	δ	0,010	0,030
	Dispersão da curva [μ m]	59,1	178,7
G3xI2 (6,0 mm ²)	\bar{X} [mm]	1,990	1,799
	δ	0,015	0,038
	Dispersão da curva [μ m]	88,7	226,3

Tabela A 2 - Dados estatísticos para construção das curvas de estabilidade entre o equipamento B1 e o equipamento A2

Configuração		B1	A1
B3 (1,05 mm ²)	\bar{X} [mm]	1,062	1,034
	δ	0,007	0,032
	Dispersão da curva [μm]	41,2	189,6
C3 (1,5 mm ²)	\bar{X} [mm]	1,278	1,192
	δ	0,008	0,026
	Dispersão da curva [μm]	47,4	154,9
B2xC3 (2,20 mm ²)	\bar{X} [mm]	1,467	1,441
	δ	0,016	0,032
	Dispersão da curva [μm]	95,1	192,4
C2xC3 (2,50 mm ²)	\bar{X} [mm]	1,525	1,539
	δ	0,008	0,033
	Dispersão da curva [μm]	48,8	200,0
E4 (3,0 mm ²)	\bar{X} [mm]	1,605	1,718
	δ	0,011	0,036
	Dispersão da curva [μm]	64,4	213,6
G4 (4,0 mm ²)	\bar{X} [mm]	1,731	1,756
	δ	0,014	0,031
	Dispersão da curva [μm]	83,5	188,6
K2 (5,0 mm ²)	\bar{X} [mm]	1,767	1,797
	δ	0,006	0,018
	Dispersão da curva [μm]	40,0	110,8
G3xI2 (6,0 mm ²)	\bar{X} [mm]	1,990	2,012
	δ	0,015	0,034
	Dispersão da curva [μm]	88,7	205,9
M2 (8,0 mm ²)	\bar{X} [mm]	2,150	2,128
	δ	0,016	0,026
	Dispersão da curva [μm]	93,5	153,0
N2 (10,0 mm ²)	\bar{X} [mm]	2,323	2,342
	δ	0,011	0,022
	Dispersão da curva [μm]	63,3	132,4

Tabela A 3 - Dados estatísticos para construção das curvas de estabilidade entre o equipamento B1 e o equipamento A3

Configuração		B1	A1
K2 (5,0 mm ²)	\bar{X} [mm]	1,767	1,878
	δ	0,007	0,011
	Dispersão da curva [μm]	39,9	68,1
K3 (7,5 mm ²)	\bar{X} [mm]	2,189	2,062
	δ	0,014	0,021
	Dispersão da curva [μm]	84,0	127,0
M3 (12,00 mm ²) - 9 clip /min	\bar{X} [mm]	2,749	2,733
	δ	0,023	0,041
	Dispersão da curva [μm]	137,8	244,6
M3 (12,00 mm ²) - 6 clip /min	\bar{X} [mm]	2,761	2,734
	δ	0,014	0,039
	Dispersão da curva [μm]	81,9	235,73